doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.04.004

基于 YOLO v5 的直播油菜激光间苗系统设计与试验

张昌松　李　伟

(陕西科技大学机电工程学院, 西安 710021)

摘要: 间苗是保证直播油菜增产的一项关键技术措施,为解决人工间苗劳动强度大、机械间苗不精确的问题,采用机器视觉的方式,基于深度学习算法 YOLO v5 平台,设计并搭建自动间苗装置。机器视觉系统评估幼苗种群的合理密植情况,间苗算法以间距和幼苗叶展为评估标准,实现控制幼苗间距和筛选优质苗的功能。选用遗传算法对间苗行进路径进行规划,相较于未规划路径可缩短最低为 50% 的行进距离,最终采用激光器高温烧除的方式完成间苗作业。选取油菜苗作为试验材料,间苗阈值 α 是划定幼苗最小间距的参数,设置不同的间苗阈值 α 进行试验。结果表明,间除苗的数量随着间苗阈值 α 的增加而增加,幼苗平均密度下降的同时种群分布趋于均匀,对间除苗的叶展长度分类统计,α 为 0 ~ 75 mm 时,间除苗叶展长度全部在 0 ~ 20 mm 范围;α 为 75 ~ 200 mm 时,间除苗叶展长度为 0 ~ 40 mm,其中叶展长度为 20 ~ 40 mm 的最高占比约为 76% ;α 为 200 ~ 350 mm 时,间除苗叶展长度在 40 mm 以上的幼苗开始增加,最高占比约为 14% ,间除苗叶展长度梯次分布证明了间苗算法具备筛选优质苗的性能。间苗执行阶段耗时占据间苗作业总耗时的 90% 以上,以激光走线参数 L、激光器功率 P、间苗距离阈值为试验因素,三因素三水平正交试验结果表明:选择合适的激光走线参数 L 能有效提高间苗死亡率、降低间苗误伤率和减少间苗耗时,在参数 L 为 30 mm、P 为 7.5 W、α 为 250 mm 下开展土槽台架性能验证试验,激光间苗平均死亡率为 93.29% ,平均误伤率为 5.19% ,平均总耗时为 15.19 min,为开发基于机器视觉的激光自动间苗机提供了理论基础和技术支撑。

关键词: 油菜; 自动间苗; YOLO v5; 激光器; 遗传算法

中图分类号: S224.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)04-0040-13　　**OSID**:

Research and Experiment of Direct Seeding Rape Laser Seedling System Based on YOLO v5

ZHANG Changsong　LI Wei

(*Department of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shaanxi University Science and Technology*, *Xi'an* 710021, *China*)

Abstract: Seedling is a key technical measure to ensure the increase of direct canola yield, based on the deep learning algorithm YOLO v5 detection platform, a visual seedling system was developed, which can visualize the planting density of seedlings and help growers grasp the situation of reasonable dense planting. An interseedling algorithm with spacing and seedling leaf spread as the evaluation criteria was developed, which can standardize the seedling spacing and meet the horticultural requirements of seedlings to remove inferiority and store excellent seedlings. The genetic algorithm was used to plan the travel path of seedlings to improve the efficiency of seedlings. Compared with unplanned routes, the travel distance can be shortened by more than 50%. Rapeseed seeds were selected as experimental materials, and set different threshold values α for the experiment. The results showed that with the increase of the threshold α of inter-seedlings, the number of inter-seedlings was also increased, and the average density of the identified area was decreased, and the leaf spread length of the inter-seedlings was classified and counted, the ladder distribution of the leaf length of the seedlings proved that the seedling extension algorithm had the function of eliminating inferiority and preserving excellence. The execution stage of the seedlings accounted for more than 90% of the total time spent in the seedling operation. The three-factor three-level orthogonal test was carried out with the laser trace range, laser power, distance

收稿日期: 2023-05-04　修回日期: 2023-06-26

基金项目: 西安近代化学研究所开放合作创新基金项目(SYJJ200304)

作者简介: 张昌松(1976—),男,副教授,博士,主要从事机器视觉研究,E-mail: zhangcs@sust.edu.cn

threshold, as the test factors. The performance verification test was carried out under the parameters of the optimal interseedling L of 30 mm, the laser power P of 7.5 W, and the inter-seedling threshold α of 250 mm, reducing the accidental injury rate of seedlings and the time consumption of seedlings. The experiment showed that the average mortality rate of laser seedlings was 93.29%, the average false injury rate was 5.19%, the average total time spent was 15.19 min. The research result provided a theoretical basis for automatic seedlings and provided equipment support for agricultural industrial planting.

Key words: rape; automatic seedlings; YOLO v5; laser; genetic algorithms

0　引言

传统油菜种植分为育苗移栽技术和直播技术两种种植方式,育苗移栽是在苗床或穴盘进行播种培育满足移栽作业要求的幼苗,再按照农艺要求将油菜苗栽植到大田的种植技术。育苗移栽虽然能够缓解轮作农时紧张矛盾,延长作物生育周期,但苗床育苗和穴盘育苗都需要耗费较多的人工、机械、基质等投入,生产成本较大,作业效率较低。

油菜直播技术是不经过育苗直接将作物种子播种至大田的种植方式,该方式因降低了油菜的种植生产成本而被广泛应用[1]。在油菜种植机械化方面,油菜规模化生产区已基本实现施肥、耕地、收获等环节的机械化生产作业。我国油菜种植具有一年多熟、土地分散、地块狭小和土壤黏重板结等典型特征,且由于水旱轮作造成土壤黏重、含水率差异大,增加了油菜机械化播种的难度,大型精量播种机械难以推广应用[2]。当前我国油菜种植方式主要是人工开沟与撒播相结合,先人工育苗再人工移栽、机开沟后再人工撒播或传统小麦播种机等改装后的机械化直播,此外无人机直播技术也逐渐兴起。

间苗是在农作物种子出苗过程中或完全出苗后,采用人工、机械、化学等方法去除弱苗保留壮苗、控制幼苗合理间距的过程,有利于培育壮苗,提高产量。

针对条播种植的作物,孙哲等[3]设计并优化了摆动式间苗锄刀,大田间苗试验平均除净率为89.4%、伤苗率为7.2%。在烟草穴盘间苗方面,何艳等[4]提出了基于机器视觉的自动间苗算法,开发了机器视觉烟苗自动间苗软件系统,间苗位置及壮苗识别平均准确率分别达到94.76%和89.58%,为视觉间苗提供了理论支持。目前国内大多数农作物间苗采用传统的人工间除[5],存在劳动强度大的问题,化控间苗会导致出苗不均,后续补苗又是一大难题。

国外已研发出相关的机械间苗装置,间苗机已在部分发达国家推广使用,以机械方式进行间苗作业与人工、化学间苗相比,具有污染少、效率高的特点。德国 Fahse 公司生产的 MONOMAT-S 型电子间苗机采用槽轮机构,利用电动机的连续旋转带动间苗锄刀往复摆动,电动机转动一周,锄刀执行间苗动作一次[6-7]。文献[8-9]设计的自动化间苗机器结合机械和化工的方式,控制执行部件喷射方向与位置,定位目标秧苗进行喷洒药剂作业,达到等距间苗的目的。

上述间苗机械能大幅提高间苗效率,但对于相应的农艺要求还有一定差距,传统间苗机械不具备甄别壮苗和弱苗的筛选功能,同时存在对土壤翻动大、影响农作物幼苗生长的缺点。培养数量足够、健康粗壮的幼苗是获取优质、适产、高效油菜籽的首要条件,本文基于机器视觉的方法,开发应用于农田间苗作业的激光间苗系统,以解决人工间苗劳动强度大、机械间苗无筛选的问题,为改善幼苗种植密度和筛选优质苗提供参考。

1　间苗装置设计

基于机器视觉的间苗系统装置结构如图 1 所示,该装置主要功能为图像采集和执行间苗。间苗试验装置主要由横向和纵向的铝合金框架组成,齿形皮带固定于框架凹槽中间,步进电机通过带轮与皮带的啮合带动激光器在框架上横向和纵向移动,激光器可通过电机定位到框架内的任意位置。图像采集架固定在纵向框架中心位置,采集架由多个铰链和固定连杆组成,该机构拥有多个自由度,可根据

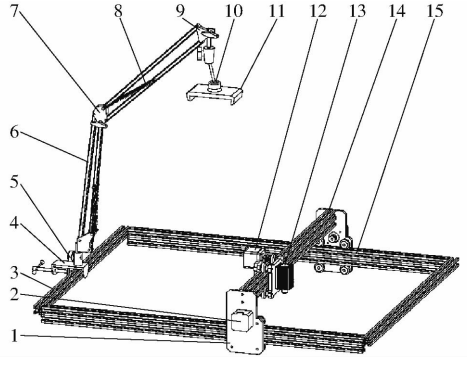


图 1　间苗装置结构示意图

Fig. 1　Schematic of structure of seedling device

1. 电机固定板　2. 横向步进电机　3. 链接框架　4. 底座固定夹　5. 固定旋钮　6、10. 连接杆　7. 连接块　8. 拉簧　9. 铰链　11. 相机固定器　12. 纵向步进电机　13. 激光器　14. 皮带　15. 横向滑轨框架

实际情况调节摄像头左右旋转角度和所处高度。整机技术参数见表 1。

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Technical parameters of broadcast sowing device

参数	数值
横纵框架尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	760×810×15
有效定位面积/m^2	0.56
激光器移动速度/($m \cdot s^{-1}$)	0.10
电机步距角精度/(°)	0.09
定位精度/mm	0.017
图像采集架高度/mm	900
激光器最大功率/W	10
摄像头分辨率/(像素×像素)	2 560×1 440
摄像头刷新率/($f \cdot s^{-1}$)	30
供电电压/V	24

作业时,摄像头固定在框架正上方,将采集的幼苗图像传输给计算机,计算机控制横向和纵向步进电机移动激光器至间除幼苗所在位置,开启激光完成间苗任务。图像数据的采集和传输如图 2 所示,在光照条件下,摄像头距离地面高度 h,拍摄幼苗区域面积范围为 $L_1 \times L_2$(L_1、L_2分别为图像采集区域的长和宽)。计算机通过图像采集卡获取实时图像,图像经过一系列算法处理后获取相关数据进行可视化展示,最终计算出间除幼苗坐标位置,控制驱动电路执行间苗。

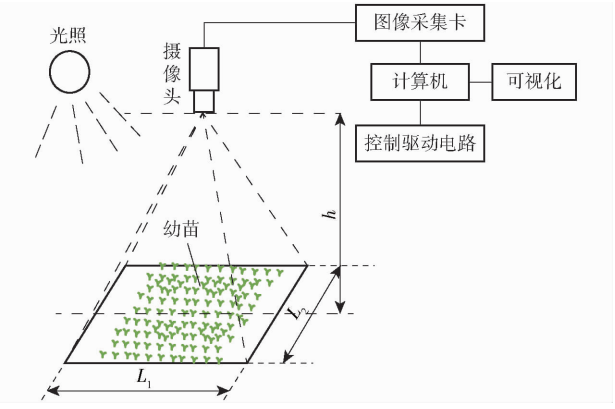


图 2 间苗图像采集原理图

Fig. 2 Image acquisition map of seedlings

由于复杂的田间环境条件,视觉间苗识别过程中存在诸多难点。首先,在目标检测任务中,由于幼苗个体小,缺乏充足的外观信息[10],因此难以将幼苗与背景或相似的目标区分开来。其次,农业间苗过程中复杂多变的田间环境相较于工业应用环境恶劣。最后,幼苗叶片的重叠、越界、变形等因素会引起较大的识别误差。

幼苗的识别检测是间苗任务中的关键环节,以上间苗难点要求图像检测识别算法具有较好的小目标检测性能,同时有着较好的泛化性能和高精确率,否则会影响到后续可视化对种植密度的评估。传统算法难以满足间苗检测精度与实时性的需求,基于卷积神经网络(CNN)[11]的目标检测算法强大表征能力与出色的可移植性使其成为间苗识别任务的最佳选择。

深度学习中以单阶段[12]的目标检测算法性能最为突出,其中最具代表性的是 YOLO[13]系列。YOLO v5 是 Ultralytics 公司于 2020 年根据工程实践发布的网络模型,该方法相较于传统图像处理方法具有更高的检测准确率和响应速度[14]。

YOLO v5 在小目标检测方面也具有优势:输入的高分辨率图像有利于提取小目标特征;使用 Mosaic 数据增强[15]对训练图像进行随机缩放、随机裁剪、随机排布的方式进行拼接,增强了小目标的检测效果;将图像分割为 n 个小区域分别检测,最后再拼接成正常图像大小,提高了对小目标的检测速度。综上,本文将用 YOLO v5 网络模型作为间苗的检测算法。

1.1 激光间苗整体流程

激光间苗的整体控制流程为:①在间苗执行模块传输开始信号前,以视频流的形式采集图像。②YOLO v5 对传入的图像进行识别,并计算各幼苗之间的距离。③将幼苗间距与设定距离阈值进行比较并分类,过近的距离会被有色线段进行标识。④根据可视化展示的情况调整距离阈值,即幼苗间距允许的最大值,距离阈值设定由相关间苗农艺要求决定。⑤间苗信号发出后,开始筛选间苗点,以叶展面积为标准对幼苗进行排序,越小的苗会被优先间除。⑥以修正的距离阈值为参数对幼苗坐标点进行稀疏化运算,至此间除苗被确定。⑦对无序的间苗点进行路径规划,缩短激光器间除幼苗中行进的距离。⑧编码单个间苗点位置坐标信息,通过串口通讯发送至间苗机构控制开发板。⑨开发板接收信息后控制步进电机将激光器移动至间除幼苗坐标点,开启激光并进行走线,至此一株幼苗被间除。⑩重复上述步骤接收每一株间除苗的位置坐标,当所有间苗点坐标传输完成并间除后,当前间苗任务结束。整体间苗流程如图 3 所示。

以上流程中 PC 端负责幼苗目标检测、图像可视化处理的工作,间除幼苗的筛选由间苗算法来完成,间苗行进路径选用遗传算法进行规划,开发板负责与 PC 端通讯和控制激光器的移动、走线和开闭。

1.2 幼苗识别与定位

采用 YOLO v5 作为相关幼苗的识别算法,在实际应用之前需要对网络模型进行整体训练,训练模型的台式计算机主要参数为:Intel Xeon(R) W -

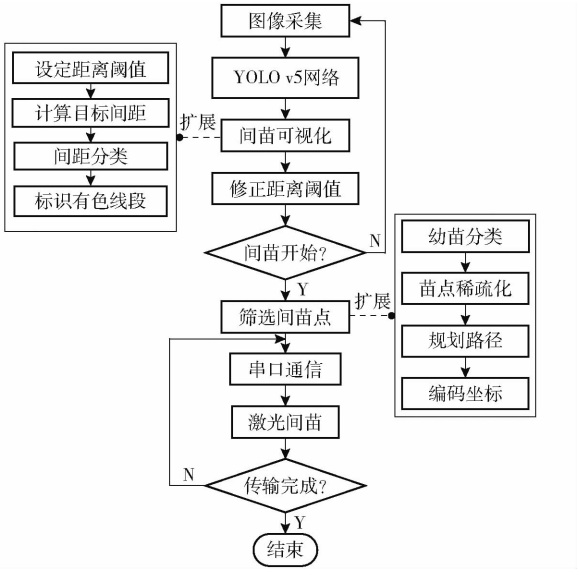


图 3　激光间苗整体流程图

Fig. 3　Visual automatic seedling system architecture

2275 处理器；64 GB，2 933 MHz 内存；NVDIA RTX 2060 Super 8G 显卡。软件主要包括 Pytorch 深度学习框架和 Arduino IDE 库。收集并制作数据集图像 2 000 幅，用于模型训练和测试，使用摄像头在俯视情况下采集分辨率为 2 560 像素 ×1 440 像素的幼苗图像，总共获得 2 000 幅高分辨率图像组成数据集，数据集以比例 4∶1分为训练集和测试集。通过马赛克、平移、缩放、旋转、色彩转换等数据增强方式扩增训练集图像，可大幅提高 YOLO v5 模型在间苗检测中对小目标识别的泛化能力，最终得到 6 000 幅图像作为训练集。利用在线标注工具 Makesense 对图像中的目标幼苗进行标注制作数据集。

选择 5.5 版本的 YOLO v5s 作为初始训练模型，其预训练权重用于间苗幼苗识别网络，设置初始学习率为 0.001，权重衰减率为 0.000 5，迭代轮数为 8 000，使用 CSPDarknet53 中的预训练模型初始化网络参数。将训练集图像和标注文件加载到深度学习网络模型中进行迭代训练，生成模型权值文件，如图 4 所示，损失曲线呈现出收敛和低振荡的特点，最终损失值保持在 0.239 0 左右。

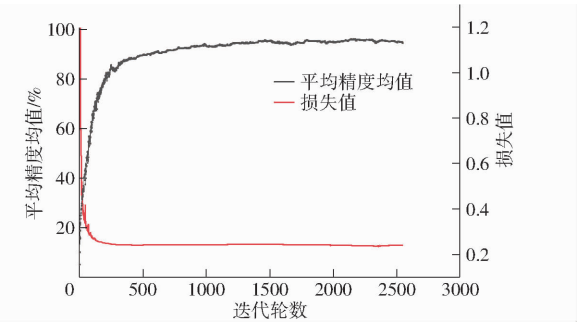


图 4　训练阶段损失值及 mAP 曲线

Fig. 4　Loss function and mAP curves

本文使用平均精度均值来度量模型的实际检测性能。测试集评估模型性能结果表明，间苗识别检测模型平均精度均值为 96.4%，检测时间为 0.33 s。

采集图像过程中摄像头存在径向畸变和切向畸变，因此在使用前需要对摄像头进行标定修正。建立世界坐标系、机构运动坐标系、图像坐标系、像素坐标系之间的转换关系，可以表示为

$$e\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathrm{d}x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{\mathrm{d}y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ h \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中　e——比例因子

(u, v)——像素平面上的投影坐标

$\mathrm{d}x$、$\mathrm{d}y$——像素尺寸

(u_0, v_0)——主点坐标

f——相机焦距，mm

$\boldsymbol{R}$——旋转矩阵

$\boldsymbol{t}$——平移矩阵

(x_w, y_w)——目标物体的世界坐标

h——目标到摄像头的距离，mm

将式(1)简化可得

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{K}[\boldsymbol{R} \quad \boldsymbol{t}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ h \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中　$\boldsymbol{K}$——相机内参矩阵

相机标定采用张定友棋盘格标定法，棋盘格型号 GP200－5，相机参数标定结果为

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} 1\,711.568\,6 & 0 & 1\,303.427\,6 \\ 0 & 1\,696.640\,1 & 7\,299.524\,4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} 0.999\,7 & 0.011\,2 & -0.007\,6 \\ -0.011\,2 & 0.999\,7 & 0.006\,6 \\ 0.007\,6 & -0.006\,6 & 0.999\,7 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{t} = [\,-72.468\,4 \quad -95.316\,0 \quad 311.744\,6\,]$$

间苗试验装置的行走机构为步进式滑车，横向和纵向滑车的结构参数相同，通过同步带确定行走长度，步进数 γ 计算公式为

$$\gamma = \frac{\beta b}{\tau z} \tag{3}$$

式中 β——每周步进数

b——细分数

τ——齿距,mm

z——齿数

同步带齿距 τ 为 2 mm,主动同步轮及被动同步轮齿数 z 均为 20,步进电机步进角为 1.8°,驱动细分数 b 为 16。

根据式(3)可得步进数的整定值为

$$\gamma=\frac{\beta b}{\tau z}=\frac{360°/1.8°\times16}{2\times20}=80\ \text{步/mm} \tag{4}$$

设图像坐标系上有两坐标点(u_1,v_1)、(u_2,v_2),通过公式(2),得到这两个坐标点在激光器移动平面上(世界坐标系)相应坐标为 $D_1(x_{w1},y_{w1})$、$D_2(x_{w2},y_{w2})$,设 D_1 为激光器位置初始点,将激光器从初始位置 D_1 移动至点 D_2,通过公式(4),得到 x 方向和 y 方向电机步进参数表达式为

$$\begin{cases}a_x=\gamma(x_{w2}-x_{w1})\\ a_y=\gamma(y_{w2}-y_{w1})\end{cases} \tag{5}$$

式中 a_x、a_y——x 方向和 y 方向上电机步进数

1.3 间苗可视化

通过人的视觉直观地判定农作物的合理密植情况是困难且不准确的,而机器视觉可以采取定量分析方法来检测油菜苗的全局分布,对油菜的合理密植情况有更为科学、精确的评估。

幼苗合理密植情况采用欧氏距离进行判断计算评估,YOLO v5 通过检测整幅图像的所有像素来得到边界框的坐标、目标物体概率和置信度。

具体可视化过程可分为如下步骤:

(1)输入在光照环境下的幼苗图像,图像分辨率为 2 560 像素×1 440 像素(图 5a)。

(2)将图像输入到 YOLO v5 间苗识别网络中进行识别,得到一系列检测油菜苗的边界框(Bounding box),第 i 个幼苗的边界框信息为

$$Z=(x_{mini},y_{mini},x_{maxi},y_{maxi},c_i) \tag{6}$$

式中 $(x_{\min},y_{\min})$——检测框左下角坐标

$(x_{\max},y_{\max})$——检测框右上角坐标

c_i——第 i 个幼苗检测框置信度

(3)根据边界框的信息计算每株油菜苗的中心坐标点并用红点标识,生成中心点坐标(x,y)为

$$\begin{cases}x=\dfrac{x_{\min}+x_{\max}}{2}\\ y=\dfrac{y_{\min}+y_{\max}}{2}\end{cases} \tag{7}$$

依据上述公式,图中 m 个幼苗中心点集合可表示为

$$\boldsymbol{D}=\{(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_m,y_m)\} \tag{8}$$

对每株油菜苗之间求欧氏距离,第 i 个和第 j 个中心点的距离计算式为

$$l_{ij}=\sqrt{(x_j-x_i)^2+(y_j-y_i)^2}$$
$$(i=1,2,\cdots,m;j=i+1,i+2,\cdots,m) \tag{9}$$

用设定的距离阈值范围(α_1,α_2)来划分间距 l_{ij},α_1为密集距离阈值,α_2为稀疏距离阈值,并对应不同颜色线段进行标识,从幼苗间距分类图像中可以看出幼苗的整体密植情况,种植密集区域以红线进行标识,对应间距 $l_{ij}\leqslant\alpha_1$;符合合理密植要求的幼苗以黄线进行标识,对应间距 $\alpha_1<l_{ij}<\alpha_2$;过于稀疏幼苗不标识,对应间距 $l_{ij}\geqslant\alpha_2$。最终可通过可视化图像定量评估幼苗合理密植情况。

(4)根据幼苗具体间苗园艺要求设置幼苗允许的最小间距,该间距记为距离阈值 α,间苗算法以距离阈值 α 为标准处理密集点位置坐标,筛选出需要间除的弱苗。

1.4 间苗算法实现原理

对于图 5 中最终得出的密集点还缺少具体的间除选择方案,幼苗间距过近实际上是相对的,判定的密集点并不需要全部间除,从密集幼苗中选择性地间除一些幼苗即可让幼苗整体上变得稀疏[16]。

为此本文设计一种间苗算法,根据间苗农艺要求,间苗算法首先要具有降低幼苗种植密度和控制幼苗合理间距的性能;其次需要在间除多余幼苗的过程中具备判别功能,即遵循优先间除弱苗,保留壮苗的准则。此外间苗可视化中修正的距离阈值 α 应作为间苗算法的间距判定参数。综上所述,间苗算法需要考虑苗间距离和幼苗优劣两方面的因素,整体间苗算法伪代码如下。

输入:幼苗点集 $\boldsymbol{D}=\{(x_1,y_1,s_1),(x_2,y_2,s_2),\cdots,(x_m,y_m,s_m)\}$,幼苗个数 m,距离阈值 α。

输出:间除幼苗集 $\boldsymbol{C}$,保留幼苗集 $\boldsymbol{F}$。



(a) 原图(2560像素×1440像素) (b) 幼苗目标检测 (c) 获取中心位置 (d) 间距分类 (e) 确定密集点

图 5 间苗可视化

Fig. 5 Visualization of seedlings

```
1 t←m, l_ij←0, C←∅, F←∅; //初始化
2 for i = 1 to m − 1 do //将幼苗按降序排列
3     for index = 1 to t − 1 do
4         if (s_[index] < s_[index+1]) then //比较 s 大小
5             temp←D_[index]; //交换幼苗位置
6             D_[index]←D_[index+1];
7             D_[index+1]←temp;
8         end if
9     next
10    t←t − 1
11 end for
12 for i = 1 to m do //以距离阈值 α 为划分标准
13     (x_i, y_i)←D_i; //选择间苗原点
14     for j = i + 1 to m do
15         (x_j, y_j) ←D_j; //邻近幼苗坐标
16         l_ij←(D_i, D_j); //计算距离
17         if (l_ij < α) then //比较 l_ij 与 α 大小
18             C. append(D_j); //添加间除点至 C
19         end if
20     end for
21 end for
22 F←(D − C);
23 return C, F;
```

(1)基于距离的间苗算法

基于距离的间苗算法思路为:首先输入间苗可视化过程中得到的幼苗位置坐标信息,根据可视化过程中修正的距离阈值 α,从幼苗点集 $\boldsymbol{D}$ 选定一株幼苗位置坐标(x_i,y_i)开始作为原点,计算邻近幼苗坐标(x_j,y_j)与原点(x_i,y_i)的距离 f,遍历所有幼苗位置坐标,如果距离 f 小于阈值 α 将坐标(x_j,y_j)添加至间除幼苗集 $\boldsymbol{C}$,如果距离 f 大于阈值 α 就跳过,再在保留下来的幼苗点集 $\boldsymbol{D}$ 中选取(x_{i+1},y_{i+1})作为下一个原点,计算其后所有点到原点(x_{i+1},y_{i+1})距离,重复上面的条件判断是否添加至间除幼苗集 $\boldsymbol{C}$,直到循环处理所有的幼苗位置坐标点,最终将幼苗点集 $\boldsymbol{D}$ 分为间除幼苗集 $\boldsymbol{C}$ 和保留幼苗集 $\boldsymbol{F}$,伪代码如算法 12 ~ 14 行所示。

如图 6 所示,一株幼苗(x_i,y_i)被选为原点,以该点为圆心、α 为半径画圆,处于圆内的幼苗会被间除,圆外的幼苗又会被选为新的原点,直到所有幼苗的间距都不超出设定的距离阈值 α。

(2)原点选择

以间距作为评估标准的间苗方案能将幼苗间距控制在不小于距离阈值 α 的范围内,但间除原点(x_i,y_i)选择的随机性会让间苗结果产生很大的差异。当一株病苗或弱苗被选为原点时,其周围与之



图 6　间苗示意图

Fig. 6　Thin out seedlings

间距小于 α 的幼苗都会被间除,包括长势更健壮的幼苗,这种无差别的间除方式只能降低幼苗种植密度,并不满足间苗去劣存优的农艺要求。因此,需要对原点(x_i,y_i)的选择加以限制和调整,壮苗应该被优先选择为间苗原点,这样就能达到保留壮苗间除弱苗的农艺要求。

优质壮苗可以由茎秆、节间、叶色、叶展、叶厚、根系等特征去评估,图像数据只有幼苗的叶色、叶展特征,叶色对于刚发芽的幼苗来说并没有太多的特征差别,最终选择幼苗的叶展特征进行壮弱评估。叶展的特征评估参数对应于油菜苗检测框的面积,弱苗的叶展短小,对应的检测框面积小;壮苗的叶展宽长,对应的检测框面积大,结合检测框信息公式(6),检测框面积 s 计算公式为

$$s=(x_{maxi}-x_{mini})(y_{maxi}-y_{mini}) \tag{10}$$

将面积参数 s 并入到公式(8)中,得到包含幼苗中心位置与叶展参数的幼苗集合为

$$\boldsymbol{D}=\{(x_1,y_1,s_1),(x_2,y_2,s_2),\cdots,(x_m,y_m,s_m)\} \tag{11}$$

将 $\boldsymbol{D}$ 中的幼苗点集按检测框面积 s 进行降序排列处理,排序能让间苗原点优先选择壮苗的要求,伪代码如算法 2 ~ 11 行所示。

间苗算法通过对幼苗叶展和间距的评估将幼苗集 $\boldsymbol{D}$ 划分为集合 $\boldsymbol{C}$ 和集合 $\boldsymbol{F}$。

设定不同的距离阈值 α 对图 7a 中识别的幼苗进行间苗测试,图 7b 是检测目标的中心点坐标,图 7c 对应不同间苗阈值 α 下的 $\boldsymbol{F}$ 集分布图。

对 α 取不同值时的幼苗株数进行统计,得出折线如图 8 所示,经过不同距离阈值 α 处理后的幼苗变得稀疏,幼苗分布也趋于均匀,曲线会随实际的幼苗分布情况而表现不同,随着间苗距离阈值 α 的增加,幼苗株数总体呈现下降的趋势。

1.5　遗传算法规划间苗路径

激光器需要经过间除苗集 $\boldsymbol{C}$ 中所有幼苗的坐标位置才能完成间苗作业,不同的间除坐标顺序在行进距离上会产生巨大的差别,激光器移动距离与间苗效率直接相关。为缩短激光器在间苗过程中的

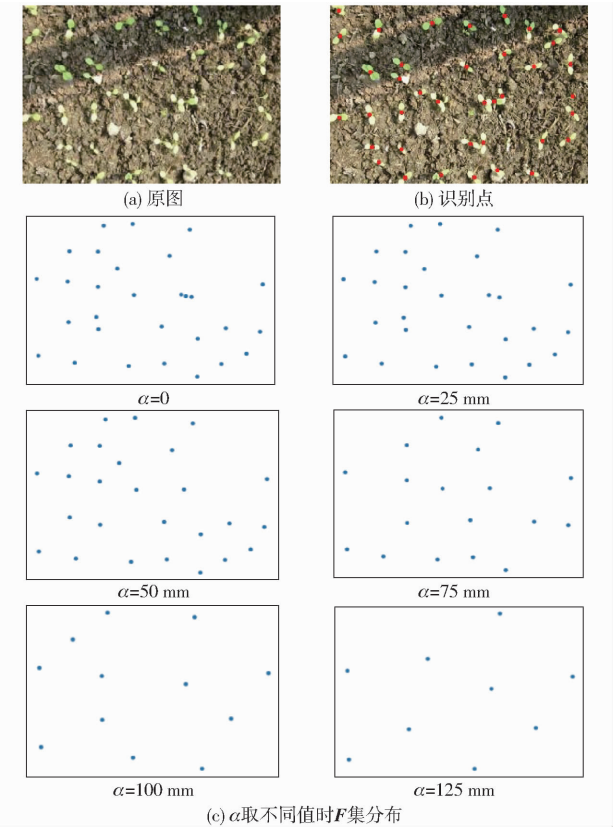


图 7 设置不同 α 值间苗后的分布图

Fig. 7 Renderings after seedlings α

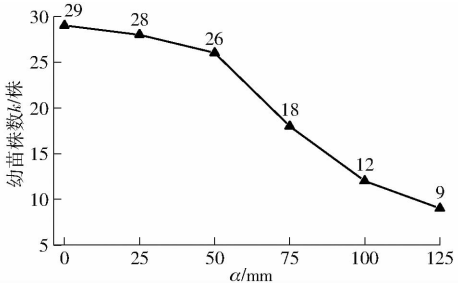


图 8 不同 α 下的间苗点数

Fig. 8 Number of points under different α

行进距离,本文选择用遗传算法来规划间苗过程中激光器行进路径[17]。

基于遗传算法(Genetic algorithm,GA)的路径规划问题可表示为

$$\begin{cases}\max f(x)\\ \text{s.t. } x\in\boldsymbol{\Omega}\end{cases} \tag{12}$$

其中 $f(x)$ 表示经过所有间苗点的路径,$\boldsymbol{\Omega}$ 是可行路径的所有集合,基本过程为从可行集 $\boldsymbol{\Omega}$ 中选择一组初始点,用 $P(0)$ 表示,代表初始种群。然后计算 $P(0)$ 中每个点对应的目标函数值,基于计算结果,产生一组新的点 $P(1)$。$P(1)$ 的产生源自于对 $P(0)$ 的交叉和变异操作,循环开展这一过程,产生种群序列 $P(2),P(3),\cdots$,直到达到停止条件。交叉和变异操作的目的在于创建一个新的种群,使得新种群目标函数的平均值能够大于上一代种群,具体流程如图 9 所示。

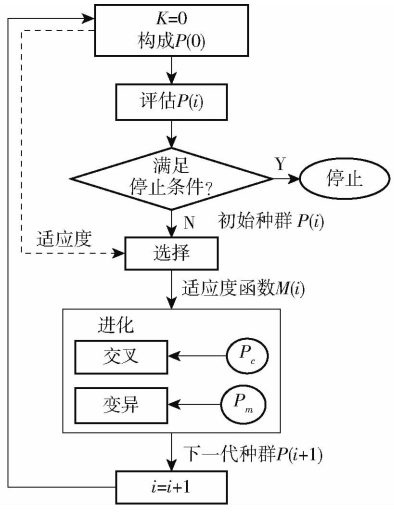


图 9 遗传算法工作流程图

Fig. 9 Genetic algorithm workflow

具体实现过程如下:

(1)编码方案

将所有的间苗路径编码成一个二维数组,每一行表示一条路线,如 2 条 n 个间苗路径向量可分别表示为 $\{x_0,x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 和 $\{x_0,x_2,x_1,\cdots,x_n\}$。

(2)适应度函数

2 个幼苗点 m 和 n 之间的距离定义为二维空间欧氏距离

$$d_{mn}=\sqrt{(x_m-x_n)^2+(y_m-y_n)^2} \tag{13}$$

则某一路线的总距离定义为

$$M=\sum_{j=1}^{n-1}l_j+l_n \tag{14}$$

式中 l_j——第 j 个点与第 $j+1$ 个点的距离

l_n——最后一个点与第一个点的距离

适应度函数 f_M 取距离倒数,即

$$f_M=\frac{1}{M} \tag{15}$$

(3)路线初始化

初始种群为随机生成的 100 条路径,由计算机生成 0 ~ $n-1$ 不重复的长度为 n 的数组。

(4)选择算子

设有 N 个个体的种群,每个个体有自己的自适应函数 $f_{Mi}(i=1,2,\cdots,N)$,计算该个体被选中的概率为

$$p_i=f_{Mi}\Big/\sum_{m=1}^{N}f_{Mm}\quad(i=1,2,\cdots,N) \tag{16}$$

根据公式(16),累积适应度 q_i 的公式为

$$q_i=\sum_{m=1}^{i}p_m \tag{17}$$

根据公式(17),累积概率 J_i 表示为

$$J_i=\frac{q_i}{q_n}\quad(i=1,2,\cdots,N) \tag{18}$$

将累积概率 J_i 映射至坐标，如图 10 所示。个体的适应度越大，其累积概率 J_i 就越大，在 0 到 1 之间抽取一个随机数，若位于累积概率 $[J_i, J_{i+1}]$ 之间，选择区间的右端点代表个体 i，反复进行该操作得出子代种群。

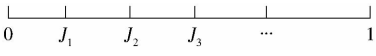


图 10　累积概率坐标

Fig. 10　Coordinates of cumulative probability

(5)交叉算子

采用基基于部分映射的交配法[18]：产生一个随机数，确定交叉的起始位置，对起始位置及之后的位置进行交换，并放在首位，然后再从各自的路径中按顺序填充未出现过的数字。

(6)变异算子

变异操作按向量维度进行[19]，即把某一维的内容进行变异。变异操作随机进行，本文取 0.01，采取对于一个路线个体随机选取两个幼苗点进行交换的策略。

(7)算法终止条件

设置的最大迭代次数 G 为 5 000，在每一次迭代之后保存最优的路线，若连续 500 次迭代之后的最优路线都没有改变，则停止迭代并输出最优的路线。

间苗环境不同会出现不同数量的间苗点，遗传算法的效率参数与初始种群数量、复制变异概率值相关，在识别点数固定和这些参数一定的情况下，遗传算法规划路径会在一定的迭代轮数收敛至距离值最小，但对于不同数量点的迭代轮数是不同的。在二维平面 2 560 像素 ×1 440 像素上随机生成 n 个坐标点进行多次路径规划测试，图 11 为取不同 n 值时平均路径距离收敛图，试验结果表明，随着迭代次数的增加，幼苗之间的路线距离在逐渐下降，在迭代次数增加的前期，幼苗点之间的距离下降快，在迭代次数增加的后期，距离 M 趋于平稳。

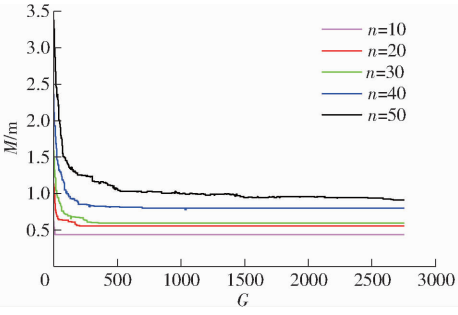


图 11　不同幼苗点数对应的平均路径距离收敛图

Fig. 11　Path convergence plot corresponding to different seedling points

图 12 为 $n=20$ 下路径随迭代次数 G 增大的路径变化图，重复乱序的路径经过规划后明显缩短。设规划后的路径距离为 M_1，则路径距离缩短百分比 θ 为

$$\theta = \frac{M - M_1}{M} \times 100\% \tag{19}$$

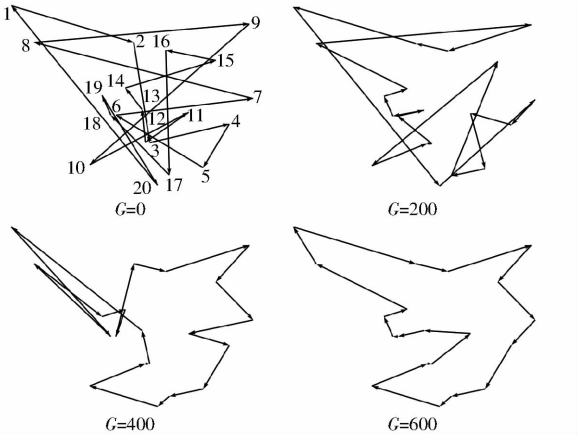


图 12　$n=20$ 下的路径规划结果

Fig. 12　Genetic algorithms plan paths results

得出 n 为 10、20、30、40、50 时的缩短百分比 θ 为 50%、51%、62%、67%、75%。n 与路径缩短百分比 θ 明显相关，路径距离缩短百分比最低为 50%，规划点的个数实际对应行进路径的复杂度，规划个数 n 越多越有路径规划的必要性。

1.6　激光与电机控制

间苗执行装置由硬件与软件组成，主要由电机控制模块与激光控制模块组成，两模块互相配合，控制装置完成间苗任务。

控制电路如图 13 所示，图中间苗执行装置与间苗系统的通讯硬件接口为有线 TTL 电平的异步串行 UART，其中 Arduino Nano 开发板是间苗试验装置的核心，主要负责与 PC 端间苗系统的通讯、电机驱动信号输出、激光器的开关等。步进电机驱动板 A3967 EasyDriver 控制 X、Y 轴电机，引脚 D2、D3 控制电机步进，D5、D6 控制电机转向，D8 为步进电机调速信号输出，输出转速对应的 PWM 信号给电子调速器，电子调速器通过内部驱动电路实现电机转速的调控，D12 控制激光通断，输出对应的 PWM 信号控制 SS8050 三极管，实现对激光功率的控制。

相比于物理装置摘除、火焰烧除、化学间除等间苗方法，使用激光器进行间苗作业具有精度高、不会破坏幼苗生长土壤环境的优点，激光器光束较小，在各种误差的影响下，对幼苗位置的定位会有一定的影响，为提高激光间苗的成功率，设计以下激光走线方案。

间苗作业时，开发板控制步进电机移动激光器至幼苗位置正上方，开启激光器后按图 14 所示进行走线，激光间苗走线由幼苗坐标位置向四周扩散的

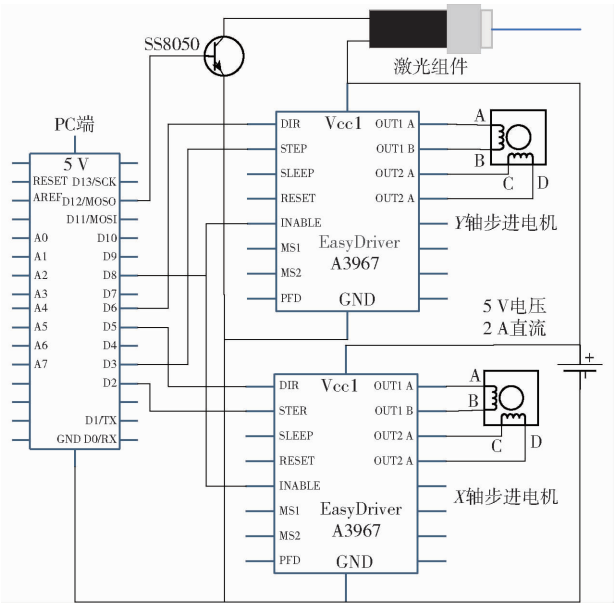


图 13 间苗机构控制电路

Fig. 13 Control circuit diagram of seedling mechanism

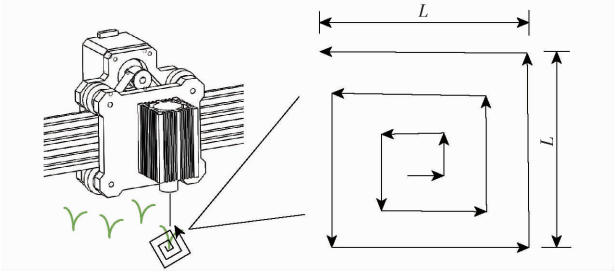


图 14 间苗激光走线图

Fig. 14 Laser routing diagram of seedlings

思路,以间苗中心位置向四周进行发散等距扫描,激光走线范围由参数 L 确定,激光照射至幼苗茎秆或叶片产生高温,从而精准间除幼苗。该方案在一定程度上减小了激光器对幼苗的定位误差,当激光器定位点与幼苗中心位置有偏差时,也能确保激光间苗有较高的成功率。

2 试验

为验证基于机器视觉的激光间苗装置的间苗准确性、间苗执行效率以及间苗最优参数,对激光间苗装置开展性能试验。

2.1 试验设备与材料

试验于 2023 年 5—8 月在陕西科技大学实验室进行,如图 15 所示,间苗试验所用 PC 端配置为 CPU i5 7300hq、显卡 GTX1060 6G、16GB 内存;滑轨的横纵长、宽为 810 mm × 760 mm,由铝合金材料制成;3 个 42 步进电机,12 V 供电,步距角精度为 0.09°,对应精度为 0.015 mm;激光器为 LEKN 乐控 10 W、发射频率为 450 nm 蓝光镭射头,行进速度为 0.2 m/s,功率为 10 W,可通过 PWM 信号(0 ~ 255)控制功率大小,激光器发射底端距离培养土 10 cm;图像采集距离地面 630 mm,采集图像分辨率为 2 560 像素 × 1 440 像素,刷新帧率为 30 f/s。

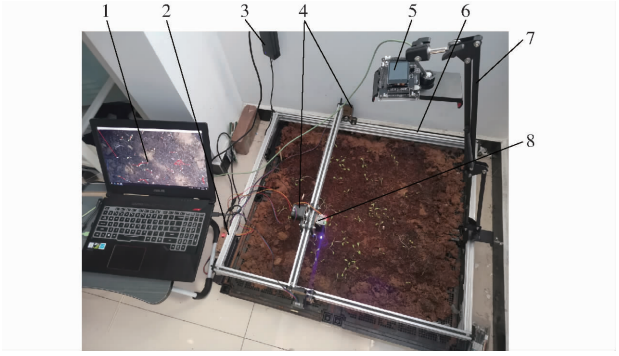


图 15 视觉间苗试验平台

Fig. 15 Visual seedling experimental platform

1. PC 端 2. 间苗执行机构控制模块 3. 电机供电电源 4. X、Y 轴步进电机 5. 摄像头 6. 滑轨 7. 摄像头调节架 8. 激光器

以撒播的方式将油菜籽播种在育苗培养土上面,培养盘为 PVC 材料,培育时间为 15 ~ 21 d。育苗面积按图像采集区域 0.6 m^2 计算,育苗基质为泡发性椰土,由废弃椰子壳压榨而成,并加入一定有机肥料而成,为体现间苗算法具有择优去劣的性能,整体随机播种分为 3 次,每播种 1 次间隔 1 d,以培育出长势不一的幼苗,幼苗发芽后正常生长,分布随机,大小不一,种植区域密度 ρ 为

$$\rho = \frac{k}{A} \tag{20}$$

式中 A——种植区域面积,m^2

培育多盘密度不同的幼苗,育苗密度分别为 150、200、250 株,试验结果表明[20],直播油菜栽培密度为 2.519×10^5 株/hm^2 时,可获得较高产量(2 388.31 kg/hm^2),换算平均密度 ρ 约为 25 株/m^2,图像采集区域的幼苗平均密度在 200 株/m^2 左右,远大于高产量密度要求,需要进行间苗作业。

2.2 试验过程

待幼苗株高达到 3 ~ 5 cm 后进行间苗试验,经过统计测量,整体幼苗真叶叶展主要分布区间为 1 ~ 7 cm,苗叶越界及遮挡现象较少,有利于进行目标幼苗检测及间苗作业。YOLO v5 间苗算法对幼苗株群的识别率达到 98%,识别效果如图 16,识别误差主要集中在幼苗聚集情况比较严重的多株幼苗整体识别为 1 株。

在对幼苗的目标检测过程中,存在检测框与幼苗边缘偏移或检测框大小与实际不相符的情况,检测框的偏移误差会直接影响最终叶展排序结果,设计试验探究偏移误差对最终排序结果的影响,具体试验方法如下:将叶展面积排序结果序号标记于识



图 16　幼苗检测效果

Fig. 16　Seedling detection rendering

别图中，如图 17 所示，然后测量相邻序号之间的幼苗叶展排序是否符合实际情况，识别的 k 株幼苗会产生 $k-1$ 组对比结果，试验在不同幼苗密度下进行，每组试验重复测定 3 次并取平均值为最终测定结果。



图 17　幼苗叶展大小标记

Fig. 17　Measuring size of leaves in statistical room

试验结果如表 2 所示，幼苗叶展排序平均准确率为 95.83%，排序误差主要来源于密集幼苗被检测为单株或幼苗倒伏导致不能正确识别叶展。

表 2　排序对比统计结果

Tab. 2　Sort and compare statistical results

密度 ρ/(株·m^{-2})	k/株	正确组数	准确率/%
150	54	51	96.22
200	72	68	95.77
250	90	85	95.51

将初始密度为 200 株/m^2 的幼苗图像传输给间苗算法进行处理，以 25 mm 为梯度对距离阈值 α 进行递增设置，统计得出间除幼苗数 k 和平均密度 ρ 的变化规律，如图 18 所示。

从图 18 中可看出，随着距离阈值 α 的增大间除幼苗数 k 增多，区域苗数密度大幅下降，整体幼苗间的分布趋于稀疏。

间除幼苗的具体组成可以检验间苗算法是否具备筛选优质苗的算法性能，如图 19 统计间除幼

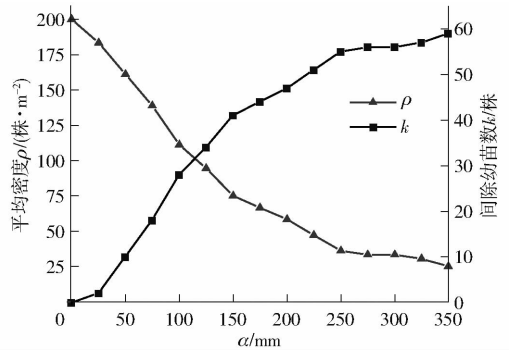


图 18　平均密度及间除幼苗数与距离阈值 α 关系曲线

Fig. 18　Change in average density and seeding removal types with distance threshold α

苗叶展的长度，并以此作为参考将幼苗数 k 分为 3 类：0 ~ 20 mm 为 k_A，20 ~ 40 mm 为 k_B，大于 40 mm为 k_C。



图 19　测量间除苗叶展

Fig. 19　Measure the size of leaves in statistical room

间苗距离阈值 α 不同大小对应间除苗的组成有较大差别，如图 20 在间苗阈值 α 取 0 ~ 75 mm 时，间除苗类型全部为 k_A，对应于叶展在 0 ~ 20 mm 的幼苗，在间苗算法中被选为原点的优先等级最低，在间除开始时会被优先选择间除。当间苗距离阈值 α 取 75 ~ 200 mm 时，间除苗的分布组成为 k_A、k_B类别，其中 k_B类占比约为 76%。当间苗距离阈值 α 取 200 ~ 350 mm 时，k_C类幼苗数量开始上升，在总体间除苗中占比约为 14%。间苗算法首先以小苗为主，随着间苗距离阈值的增大而逐步扩至中大苗，该分布证明了间苗算法具有优先间除小苗、保留壮苗的性能。

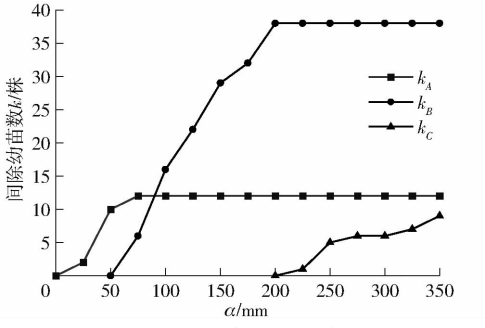


图 20　间除苗类型统计图

Fig. 20　Statistical chart of seedling removal types

在间苗系统运行效率方面，系统运行过程可以分为目标检测、间苗算法、路径规划和间苗执行 4 个

阶段进行分析,间苗任务总耗时 T 可表示为

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + \zeta \tag{21}$$

式中 T——间苗总耗时,s

T_1——目标检测耗时,s

T_2——间苗算法耗时,s

T_3——路径规划耗时,s

T_4——间苗执行耗时,s

ζ——其他耗时,s

系统运行效率初步试验方法如下:设置激光走线范围参数 L 为 50 mm,选择密度为 200 株/m^2 的幼苗培养盘进行间苗试验,表 3 统计了不同距离阈值 α 下间苗系统运行各阶段耗时情况,其中目标检测耗时 T_1 和间苗算法耗时 T_2 都处于稳定水平,平均耗时分别为 0.34 s 和 0.07 s,间除点数 k 越多,最优路径越复杂,路径规划耗时 T_3 所需的时间也就越多,整个间苗过程中的时间消耗主要集中在间苗执行 T_4,间苗执行阶段所消耗的时间占据总消耗时间的 90% 以上,随着间除点的增多,在总耗时中的占比也越高。

表 3 间苗系统运行时间统计结果

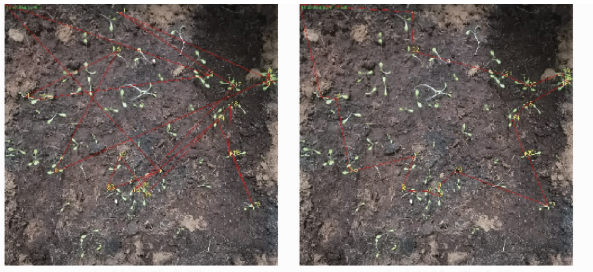
Tab. 3 Statistics on running time of seedling system

α/mm	k/株	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_4/s	T/s	T_4/T
50	29	0.33	0.06	5.63	365.56	408.34	0.89
100	48	0.38	0.06	10.31	586.96	639.27	0.91
150	61	0.35	0.06	14.61	941.47	998.08	0.94
200	67	0.33	0.08	16.17	1 105.09	1 163.26	0.95
250	75	0.34	0.07	18.41	1 323.25	1 383.66	0.95
300	76	0.32	0.08	18.72	1 350.52	1 411.24	0.96
350	79	0.34	0.07	19.86	1 432.33	1 494.19	0.96

间苗执行阶段包括控制步进电机行进至间除苗坐标位置和开启激光走线过程。图 21a 为未规划前激光器的行进顺序路线,遗传算法规划路径后,激光器从图 21b 中左上角初始点出发,按红线路径顺序依次行进至间除苗位置,开启激光进行走线,完成间苗任务后返回初始点。在间苗路径已规划的前提下,激光走线范围是间苗执行耗时的可控因素,同时也会影响间苗作业的其他性能,需设计新的试验进行验证。

2.3 正交试验

利用激光产生高温的方法间除幼苗,主要影响因素有图像识别对幼苗的定位精度、激光器的走线范围和激光器的功率。激光器的走线范围参数 L 是间苗作业中重要的可控因素,合适的走线范围能在一定程度上弥补对视觉幼苗中心位置的定位误差,过大的走线范围会增大对其他幼苗的误伤概率。参考试验幼苗叶展平均长度为 30 mm,



(a) 初始间苗路线 (b) 规划后间苗路线

图 21 α 为 100 mm 时遗传算法规划路线

Fig. 21 Genetic algorithms plan routes when α was 100 mm

激光器走线范围参数 L 取 20、30、40 mm 3 个水平,考虑激光器功率因素,激光器的功率设置 2.5、5.0、7.5 W,设计间苗距离阈值 α 为 50、150、250 mm 3 个水平,开展三因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交试验,因素水平如表 4 所示。

表 4 正交试验因素水平

Tab. 4 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	L/mm	P/W	α/mm
1	20	2.5	50
2	30	5.0	150
3	40	7.5	250

综上所述,设计激光间苗试验共 9 组,每组试验的幼苗种植密度为 200 株/m^2,统计激光间除幼苗死亡率 η 和误伤率 ψ,计算公式为

$$\eta = \frac{\mu}{k_0} \times 100\% \tag{22}$$

$$\psi = \frac{\lambda}{k_0} \times 100\% \tag{23}$$

式中 μ——实际选中幼苗死亡数量,株

λ——未选中幼苗死亡数量,株

k_0——选中间除幼苗数量,株

每组试验重复测定 3 次并取平均值为最终测定结果,试验方案与试验结果如表 5 所示,A、B、C 为因素水平值。R_1 大小反映了各因素对试验结果的影响程度,表中激光走线参数的 R_1 为 9.66,是影响间苗死亡率 η 的最优因素,对试验结果影响最大,其次是激光器功率,最后是间苗距离阈值。同理可得影响 ψ 和 T 的因素主次顺序为 L、α、P。

在机器视觉激光间苗试验中,激光走线参数 L 显著影响间苗死亡率、间苗误伤率和间苗总体耗时。较大的激光走线参数 L 增加了激光照射在幼苗上的概率,可以有效降低定位误差对间苗作业的影响,同时也增大了对其周围幼苗误伤率和走线耗时,在激光走线参数 L 为 40 mm 时,间苗死亡率为最高,达到 89.39%,同时间苗误伤率和间苗耗时也最高,分别为 5.43% 和 12.99 min。激光器功率主要影响间

苗死亡率，试验结果表明，设置激光器在 5.0 W 以上即可满足间苗要求。距离阈值 α 决定间除幼苗个数，α 取值为 250 mm 时，选中间除幼苗数量多，对应保留的幼苗种群密度小，会直接增加间苗执行耗时和降低对幼苗的误伤概率。

表 5　试验设计方案与结果

Tab. 5　Results of orthogonal

试验号	因素			死亡率	误伤率	间苗执行耗时
	A	B	C	η/%	ψ/%	T_4/min
1	1	1	1	62.07	3.45	4.77
2	1	2	2	86.89	1.64	7.65
3	1	3	3	90.67	1.33	11.81
4	2	1	2	73.77	4.92	10.68
5	2	2	3	93.33	4.00	15.33
6	2	3	1	89.66	6.90	5.38
7	3	1	3	80.00	2.67	18.52
8	3	2	1	93.10	10.34	6.81
9	3	3	2	95.08	3.29	13.63
η	k_1	79.88	85.58	89.39		
	k_2	71.95	91.10	91.08		
	k_3	81.61	85.25	88.00		
	R_1	9.66	5.85	3.08		
ψ	k_1	2.14	5.27	5.43		
	k_2	3.68	5.33	3.84		
	k_3	6.90	3.28	2.67		
	R_1	4.76	2.05	2.76		
T_4	k_1	8.07	10.46	12.99		
	k_2	11.32	9.93	10.27		
	k_3	5.65	10.65	15.22		
	R_1	5.67	0.72	4.95		

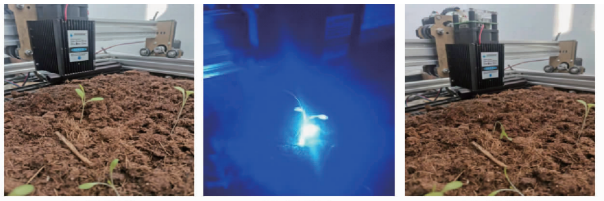
2.4　验证试验

选择激光走线参数 L 为 30 mm，在间苗死亡率、误伤率和间苗耗时都有较高的性能参数。设置激光器功率为 7.5 W、间苗距离阈值 α 为 250 mm 应用于待间苗试验幼苗中，在土槽台架上开展性能验证试验，试验分别在 3 组不同密度的幼苗区域进行。试验结果如表 6 所示。结果表明，激光间苗在越密集的区域工作误伤率和总耗时会增加，激光间苗平均死亡率为 93.29%，平均误伤率为 5.19%，平均间苗总耗时为 15.19 min，表 3 中 α 取 250 mm 时，间苗总耗时约为 23.06 min。激光间除效果如图 22 所示，间除苗在激光高温的作用下植株茎秆已经出现弯折，1 ~ 2 d 后完全枯萎死亡。

表 6　激光间苗性能试验结果

Tab. 6　Results of laser seedling performance test

密度 ρ/(株·m^{-2})	k/株	死亡率 η/%	误伤率 ψ/%	总耗时 T/min
150	47	93.62	4.26	13.42
200	65	93.85	4.71	15.25
250	83	92.77	6.02	16.90



(a) 间苗前　(b) 间苗中　(c) 间苗后

图 22　激光间苗效果

Fig. 22　Laser seedling rendering

因此，本文所研究的视觉激光间苗系统，能准确有效地完成间苗任务。在选择激光走线范围 L 为 30 mm、激光器功率设置为 7.5 W、间苗阈值 α 为 250 mm 的试验条件下，可有效提高间苗死亡率、降低间苗误伤率和减少间苗耗时。此外，激光矩形走线方案本质上弥补了间苗装置对幼苗的定位误差，但也对间苗作业效率产生了较大的影响，间苗执行阶段耗时占据间苗作业总耗时的 90% 以上，若提高间苗软硬件系统对幼苗的定位精度，则可设置更小的激光走线参数 L 来完成间苗任务，大幅减小激光器移动距离，实现降低间苗误伤率和提高间苗效率的目标。

通过以上试验数据验证了室内间苗效果，试验装置与实际环境具体应用有一定差距，室内试验数据表明，间苗系统具备间苗的应用效果，但应用于田间的间苗机械在精度方面有一定的要求。此外，在幼苗检测方面，需要考虑农田杂草对幼苗检测产生的影响。

3　结论

(1) 针对采用直播种植的油菜存在人工间苗劳动强度大、机械间苗不精确的问题，搭建了基于机器视觉的激光间苗试验装置。该方法可实现评估幼苗种植密植、控制幼苗种植间距和筛选优质苗的功能。

(2) 基于 YOLO v5 深度学习网络的幼苗检测模型，开发间苗算法，该算法以幼苗间距和幼苗叶展长度为评估标准，优先选择壮苗为间苗原点，间除其周围过近的弱苗。试验表明，间苗算法平均耗时为 0.07 s，间苗算法叶展长度排序平均正确率为 95.83%。

(3) 利用遗传算法对激光器行进路线进行规划，分析拟合不同间苗数与最优迭代步数之间的关系。测试结果证明规划点数与路径复杂度明显相关，路径规划后的行进距离与未规划前相比缩短 50% 以上。

(4) 开展间苗性能验证试验，结果表明，整个间苗过程中，间苗执行阶段耗时占据间苗作业总耗时的 90% 以上。进一步的正交试验表明，选择合适的激光走线范围可以提高间苗死亡率、降低间苗误伤

率和减少间苗耗时。在最优间苗参数 L 为 30 mm 下开展性能验证试验，激光间苗平均死亡率为 93.29%，平均误伤率为 5.19%，平均间苗总耗时为 15.19 min。

参 考 文 献

[1] 蒯婕，王积军，左青松，等. 长江流域直播油菜密植效应及其机理研究进展[J]. 中国农业科学，2018，51(24)：4625 - 4632.
KUAI Jie，WANG Jijun，ZUO Qingsong，et al. Effects and mechanism of higher plant density on directly-sown rapeseed in the Yangtze River basin of China[J]. Scientia Agrieultura Sinica，2018，51(24)：4625 - 4632. (in Chinese)

[2] 廖庆喜，雷小龙，廖宜涛，等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报，2017，48(9)：1 - 16.
LIAO Qingxi，LEI Xiaolong，LIAO Yitao，et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(9)：1 - 16. (in Chinese)

[3] 孙哲，张春龙，马瑶瑶，等. 摆动式间苗机器人锄刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(9)：70 - 75.
SUN Zhe，ZHANG Chunlong，MA Yaoyao，et al. Optimal design and experiment of thinning hoe for swing motion thinning robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(9)：70 - 75. (in Chinese)

[4] 何艳，夏志林，祝诗平，等. 基于机器视觉的穴盘烟苗自动间苗算法研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学)，2019，34(1)：50 - 57.
HE Yan，XIA Zhilin，ZHU Shiping，et al. Automatic thinning algorithm of plug seedling based on machine vision[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)，2019，34(1)：50 - 57. (in Chinese)

[5] LIU Fei，LIU Meng，ZHAO Yu，et al. Empirical study on influencing factors of foxtail millet farmers using chemical chopping-out technology in half arid area[J]. Science and Technology Management Research，2018，47(2)：171 - 176.

[6] 范素香，侯书林，赵匀. 国内外甜菜生产全程机械化概况[J]. 农机化研究，2011，33(3)：12 - 15.
FAN Suxiang，HOU Shulin，ZHAO Yun. Overview of full mechanization of sugar beet production in domestic and overseas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2011，33(3)：12 - 15. (in Chinese)

[7] 卢秉福，张祖立. 甜菜生产机械化的研究进展及发展趋势[J]. 农机化研究，2007，29(1)：59 - 62.
LU Bingfu，ZHANG Zuli. Research evolution and development tendency on mechanization of sugar beet production[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2007，29(1)：59 - 62. (in Chinese)

[8] SIEMENS M C，HERBON R，HERBON R，et al. Automated machine for thinning lettuce development and evaluation[C]// ASABE International Meeting，2012.

[9] HERBON R. Automated machine for selective in situ manipulation of plants：US，WO/2012/094116[P]. 2012 - 07 - 12.

[10] LENG Jiaxu，REN Yihui，JIANG Wen，et al. Realize your surroundings：exploiting context information for small object detection [J]. Neurocomputing，2021，433(14)：287 - 299.

[11] LECUN Y，BOTTOU L，BENGIO Y，et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. Proceedings of the IEEE，1998，86(11)：2278 - 2324.

[12] LIU W，ANGUELOV D，ERHAN D，et al. SSD：single shot multibox detector[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision，2016.

[13] 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，2016：779 - 788.

[14] REN S，HE K，GIRSHICK R，et al. Faster R - CNN：towards real-time object detection with region proposal networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems，2015，9199(10.5555)：2969239 - 2969250.

[15] ZHENG Z，WANG P，LIU W，et al. Distance-IoU loss：faster and better learning for bounding box regression[C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence，2020，34(7)：12993 - 13000.

[16] 陈嘉阳，卜宪海，陈殿称，等. 顾及地形复杂度因子权重的多波束点云抽稀算法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版)，2022，41(5)：21 - 29.
CHEN Jiayang，BU Xianhai，CHEN Dianchen，et al. A thinning algorithm of multibeam point cloud considering weight of terrain complexity factor[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)，2022，41(5)：21 - 29. (in Chinese)

[17] 梁晶. 遗传算法与蚁群算法在商旅问题中的应用研究[J]. 电子测试，2017(9)：38 - 39.
LIANG Jing. Research on the application of genetic algorithm and ant colony algorithm in business trip[J]. Electronic Testing，2017(9)：38 - 39. (in Chinese)

[18] LIAO S，HU Y，ZHU X，et al. Person re-identification by local maximal occurrence representation and metric learning[C]// 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE，Boston，2015：2197 - 2206.

[19] 谢燕丽，许青林，姜文超. 一种基于交叉和变异算子改进的遗传算法研究[J]. 计算机技术与发展，2014，24(4)：80 - 83.
XIE Yanli，XU Qinglin，JIANG Wenchao. An improved genetic algorithm based on crossover and mutation operators[J]. Computer Technology and Development，2014，24(4)：80 - 83. (in Chinese)

[20] 薛中民. 油菜直播不同栽培密度对产量的影响试验初报[J]. 南方农业，2017(4)：63 - 64.