

异常水培生菜自动分选系统设计与试验

武振超¹ 杨睿哲¹ 王文奇¹ 傅隆生^{1,2} 崔永杰¹ 张 昭³

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100;
3. 北达科他州立大学农业与生物工程系, 法戈 58102)

摘要: 为解决水培生菜包装前分选机械化程度低、分选任务重的问题,结合深度学习方法设计了一种异常水培生菜自动分选系统。该系统由信息感知、信息处理以及分选动作执行3个子系统组成。根据水培生菜异常叶片与正常叶片间差异性进行水培生菜分类,采用从下向上的三摄像头配合拍摄方式进行图像信息感知,并基于语义分割DeepLabV3+深度学习网络实现水培生菜图像信息实时处理,其处理性能为:平均联合交并比达83.26%,像素精度为99.24%,单幅图像处理时间为 (193.4 ± 4) ms。为便于实现异常水培生菜分选,基于水培生菜的表型及采收模式,设计了一种托架式异常水培生菜分选执行子系统,并以横向支撑杆角度、纵向支撑杆角度和步进电机转速为试验因素,以分选动作执行子系统的分选成功率为评价指标,设计二次正交旋转组合试验。建立了各因素与指标间回归数学模型,运用Design-Expert软件的多目标优化算法进行参数优化。获得参数最优组合为:横向支撑杆角度 146° 、纵向支撑杆角度 150° 、步进电机转速11 r/min。依据参数最优组合进行性能试验,得到分选动作执行子系统的分选成功率为98%,异常水培生菜自动分选系统的分选成功率为95%,满足生菜冷藏运输技术标准要求。

关键词: 异常水培生菜; 自动分选系统; 深度学习; 分选动作执行子系统; 参数优化

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0282-09 OSID: 

Design and Experiment of Sorting System for Abnormal Hydroponic Lettuce

WU Zhenchao¹ YANG Ruizhe¹ WANG Wenqi¹ FU Longsheng^{1,2} CUI Yongjie¹ ZHANG Zhao³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Department of Agricultural and Biosystems Engineering, North Dakota State University, Fargo 58102, USA)

Abstract: To address problems of low mechanization level and labor-intensive sorting tasks before packaging of hydroponic lettuce, an automatic sorting system for abnormal hydroponic lettuce was designed in combination with the deep learning method. The automatic sorting system was composed of an information perception sub-system, an information processing sub-system, and a sorting action execution sub-system. Hydroponic lettuce classification was based on the difference between abnormal and normal leaves. Three cameras from bottom to top were used to capture images. Real-time processing of hydroponic lettuce images was realized based on semantic segmentation DeepLabV3+. The image segmentation model had mIoU of 83.26%, PA of 99.24% and image processing velocity of (193.4 ± 4) ms/frame. To realize sorting of abnormal hydroponic lettuce, a bracket-type hydroponic lettuce sorting sub-system was designed based on phenotype and harvesting mode of the hydroponic lettuce. Quadratic orthogonal rotational-combinational experiments were designed. Experiments on factoring in horizontal and longitudinal support rod angles and stepping motor speed were conducted to obtain the highest sorting success rate. Regression mathematical models between factors and index were multi-objectively optimized by using Design-Expert software. Optimal combination of parameters was obtained, including the horizontal support rod angle of 146° , the longitudinal support angle of 150° , and the stepping motor speed of 11 r/min. Perform test was carried out according to the optimal combination of parameters. The sorting success rate of the sorting action execution sub-system was 98%, and the

收稿日期: 2021-07-15 修回日期: 2021-08-10
基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018TSCXL-NY-05-04)和国家外国专家局高端外国专家引进计划项目(G20200027075)
作者简介: 武振超(1993—),男,博士生,主要从事智能化检测与控制研究,E-mail: wuzhenchao@nwafu.edu.cn
通信作者: 傅隆生(1984—),男,教授,博士生导师,主要从事智慧农业技术与装备研究,E-mail: fulsh@nwafu.edu.cn

sorting success rate of the abnormal hydroponic lettuce automatic sorting system was 95% , which met technical standard requirements of lettuce refrigerated transportation.

Key words: abnormal hydroponic lettuce; automatic sorting system; deep learning; sorting action execution sub-system; parameter optimization

0 引言

水培生菜,菊科莴苣属,其市场需求量大且生长周期短(仅为 45 d 左右),具有较高的经济价值。鉴于此,水培生菜成为当下植物工厂中栽培最为广泛的蔬菜之一^[1-4]。随着水培生菜种植规模的扩大,对水培生菜的收获自动化水平也提出了新的要求,马义东等^[5]设计了一种水培生菜自动包装装置,该装置可完成水培生菜自动包装提高包装效率,但未对包装前含有异常叶片的水培生菜进行分选。

水培生菜在成熟后会出现异常叶片(下文中将该种生菜统称为异常水培生菜),以黄叶、枯萎叶和腐烂叶为主,异常叶片会缩短生菜的货架期,同时也对生菜的商品价值产生较大影响。特别当生菜叶片发生腐烂后,在滋生细菌的同时,生菜中的亚硝酸盐含量会急剧上升,食用这种带有腐烂叶片生菜后会对人体健康造成威胁^[6-8]。因此,在对水培生菜进行包装前,及时分选出含有异常叶片的水培生菜是十分必要的。目前,生菜的分选基本依靠人工,费时费力、效率低下,也增加了人力成本,不利于植物工厂的高质量发展。因此,研究可实现异常水培生菜分选的装置具有重要意义。

针对不同农产品分选装置,相关研究^[9-12]多集中于特征检测、末端执行器及分选方式等方面。通过深度学习方法实现农产品特征检测,并结合农产品表型特征设计末端执行器及分选方式,可用于农产品分选装置设计研究。

本文在本课题组研发的水培生菜整株低损收获装置^[3]基础上,基于深度学习方法,以水培生菜所含异常叶片类型为分选依据,结合水培生菜表型特征及采收模式,进行异常水培生菜自动分选系统设计,该系统包含三摄像头图像信息感知、异常水培生菜图像信息处理及托架式分选动作执行 3 个子系统。通过设计二次正交旋转组合试验对分选动作执行系统中各因素进行优化,最后通过性能试验验证异常水培生菜自动分选系统工作性能。

1 水培生菜特征分类

根据前期调研发现,植物工厂内水培生菜异常叶片主要为黄叶、枯萎叶和腐烂叶,且健康正常的水培生菜叶片与异常叶片之间存在如下差异:首先,水

培生菜健康叶片与异常叶片在外观颜色上存在一定差异。健康水培生菜叶片呈绿色,表面光滑,如图 1a 所示。黄叶(Yellow leaves)、枯萎叶(Withered leaves)和腐烂叶(Decay leaves)的颜色分别变为黄色、棕色和黑色,如图 1b 所示。其次,不同状态的水培生菜叶片纹理也存在差异,黄叶的质地没有明显变化;枯萎叶失水皱缩,但基本保持叶片外形;腐烂叶质地变软并发生腐坏,叶片纹理消失,外形无固定形状。异常叶片与健康叶片在颜色和质地上的差异使得利用机器视觉信息感知技术对含异常叶片水培生菜进行分类成为可能。

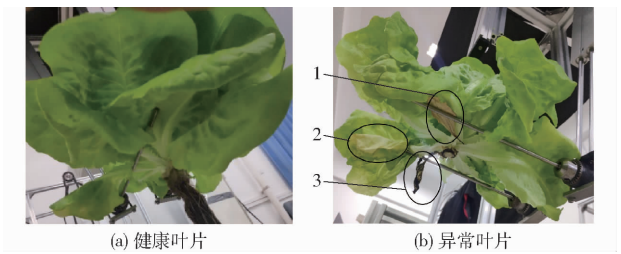


图 1 水培生菜健康叶片与异常叶片示例

Fig. 1 Examples of healthy and abnormal leaves of hydroponic lettuce

1. 枯萎叶 2. 黄叶 3. 腐烂叶

2 分选系统设计

2.1 总体结构

异常水培生菜自动分选系统主要由信息感知、信息处理以及分选动作执行 3 个子系统组成。该分选系统用于剔除水培生菜整株低损收获装置^[3]所采收的异常水培生菜,其与收获装置间位置关系见图 2a。带有水培生菜的定植板自水培槽中取出,定植板经传送链送至采收运输机构处,通过采收运输机构对菜叶的低损聚拢、割刀对生菜茎部的精准切割,实现单株水培生菜的整株低损收获,并运输至分选系统处。图 2b 为系统整体结构,其中,部件 10 ~ 12 构成信息感知子系统主体;基于 DeepLabV3 + 深度学习网络构成信息处理子系统主体;部件 13 ~ 22 构成分选动作执行子系统。

2.2 信息感知子系统

考虑到水培生菜异常叶片多数出现在生菜底部,采用从下向上拍摄方式进行图像采集。拍摄初期将摄像头布置在水培生菜的正下方,采用这种方式进行拍摄时可利用最少的相机采集到生菜底部全

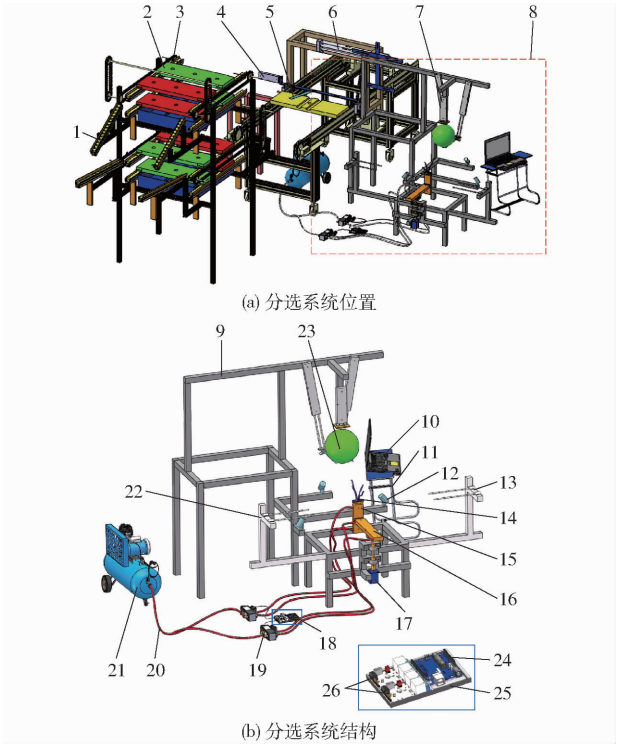


图 2 异常水培生菜自动分选系统
Fig.2 Automatic sorting system for abnormal hydroponic lettuce

1. 传送链 2. 定植板 3. 水培生菜整株低损收获装置 4. 切割气缸 5. 割刀 6. 输送气缸 7. 采收运输机构 8. 异常水培生菜自动分选系统 9. 框架 10. 便携式计算机 11. 计算机放置台 12. 摄像头 13. 干黄叶处理包装区 14. 托架式末端执行器 15. 托举气缸 16. 推进气缸 17. 步进电机 18. 控制部件 19. 电磁阀 20. 输气软管 21. 气泵 22. 丢弃区 23. 待分选生菜 24. 单片机 25. 部件外壳 26. 继电器模块

貌,方便后续图像处理。但在拍摄过程中发现,水培生菜上掉落的杂物会污染镜头,影响摄像头成像质量(图 3),对拍摄工作造成影响。

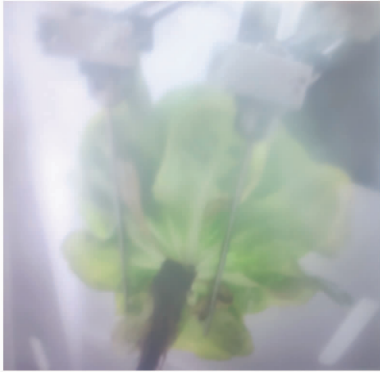


图 3 受污染摄像头成像
Fig.3 Contaminated camera imaging

经过分析调整确定采用 3 个微软摄像头(LifeCam Studio,梦剧场精英版)进行图像采集。摄像头布置方式为:在水培生菜底部 26 cm 的平面内,以生菜根部投影为圆心,半径 15 cm,间隔 120°进行摄像头布置,同时设置摄像头仰角为 60°,此时摄像

头距离生菜 30 cm。该种状态下摄像头既不会受水培生菜上掉落的杂物影响,又保证能对整个生菜底部完全成像,同时也增加水培生菜数据集的多样性,见图 4。

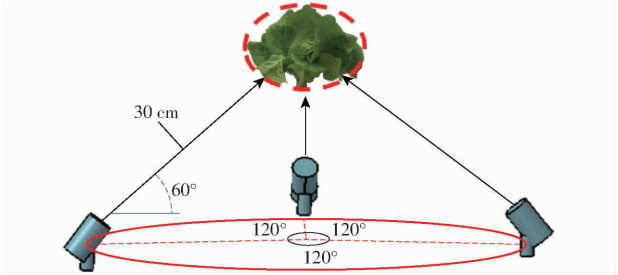


图 4 图像采集方法
Fig.4 Image acquisition method

2.3 信息处理子系统

2.3.1 信息处理网络结构

本文基于语义分割 DeepLabV3 + 深度学习网络实现异常叶片检测。DeepLabV3 + 网络可实现基于像素的分割,网络将对输入的图像进行像素遍历,对图像中的每个像素点进行内容判断并划分类别^[13-14]。相对于目标检测和分类,语义分割是一项计算量更大也更精细的工作。由于图像中每个像素都被进行了分类,图像中目标的各个部位是被精准分类的,相对于目标检测和识别其边缘也更清晰。另外,DeepLabV3 + 是一种端到端的图像分割方法,由网络架构和后端网络 2 部分组成,其引入了编码器-解码器(Encoder - Decoder)结构,网络将 DeepLabV3 作为编码器,以高效的深度可分离卷积网络作为解码器,更大程度地提高模型的效率^[15]。同时该网络将空洞空间卷积池化金字塔(Atrous spatial pyramid pooling, ASPP)方法与 Encoder - Decoder 结构进行融合,充分挖掘上下文的多尺度信息的同时重构空间信息,更好地捕捉物体的边界,DeepLabV3 + 网络结构如图 5 所示。其中,水培生菜图像被分割为背景(黑色像素点)、生菜(红色像素点)、黄叶(绿色像素点)、枯萎叶(黄色像素点)和腐烂叶(蓝色像素点),见图 6。

2.3.2 信息处理子系统配置及性能

本研究选用良泰深度学习计算机进行模型训练,采用 ubuntu 16.04 系统,处理器为 6 核 Intel Xeon E5 - 1650 v4, 32 GB 内存,主频 3.6 GHz, NVIDIA TITAN XP 显卡,12 GB 显存。使用 Pycharm 开发环境,算法实现语言为 Python 3.7,特征提取网络选用 ResNet - 101 模型。

在进行图像样本采集时,为保证所训练图像分割模型在实际工况光照条件下的性能及鲁棒性,样本采集期间全程处于室内,室内照明灯光为自房间

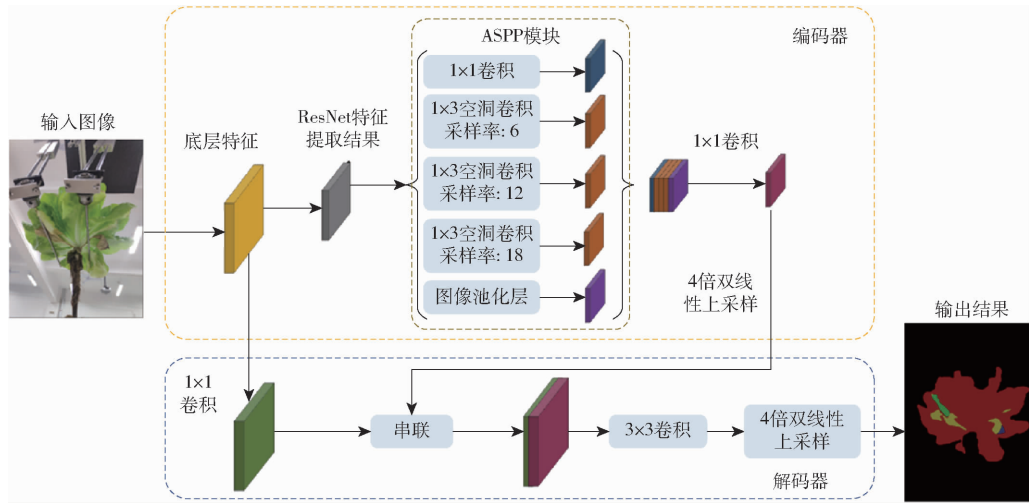


图 5 基于 DeepLabV3 + 水生菜图像分割网络

Fig. 5 Image segmentation network of hydroponic lettuce based on DeepLabV3 +

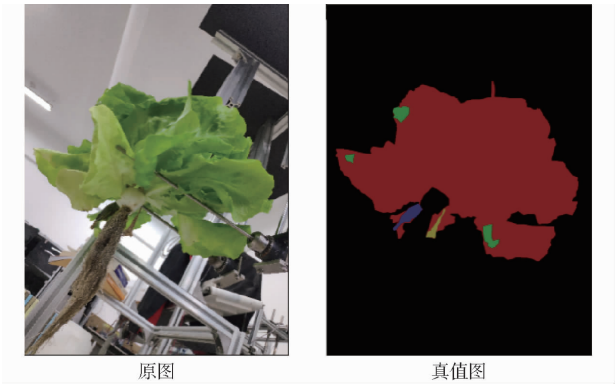


图 6 基于 DeepLabV3 + 水生菜图像分割效果
Fig. 6 Image segmentation results of hydroponic lettuce based on DeepLabV3 +

顶部向下直射,无另外人为补光,同时,为保证图像采集时光照随机性,在全天不同时刻进行数据采集。样本采集后,以水生菜叶片的颜色和纹理作为学习特征进行标注,将原始图像缩放至 378 像素 × 504 像素后,分别将黄叶、枯萎叶和腐烂叶标注为“yellow”、“withered”和“decay”,用于网络训练的初始图像为 500 幅,经水平镜像、竖直镜像、顺时针旋转 90°、顺时针旋转 180°和顺时针旋转 270° 5 种方式扩增后图像为 3 000 幅,随后按比例 4: 1 随机划分为训练集和测试集^[16-19]。

相较传统图像处理方法,深度学习方法具备更强的鲁棒性以及更强大的物体识别性能^[20],本文通过像素准确率 (Pixel accuracy, PA)、平均联合交并比 (mean intersection over union, mIoU) 和单幅图像分割时间来评估模型的性能^[21-24]:经测试,模型识别像素准确率达 99. 24%,平均联合交并比达 83. 26%,单幅图像处理时间 (193. 4 ± 4. 0) ms,网络模型性能良好。

2.4 分选动作执行子系统

2.4.1 末端执行器

水生菜的外部轮廓特点是末端执行器设计的

重要依据。水生菜采收后采用支撑杆架空的状态向包装装置输送,末端执行器的作业空间被压缩到较小范围,这对分选系统的末端执行器提出了较高要求。水生菜处于支撑杆上时,受重力作用,水生菜整体下沉,外围叶片收拢,经预试验测定得外围叶片轮廓与水平间夹角 θ 约为 30°,见图 7。

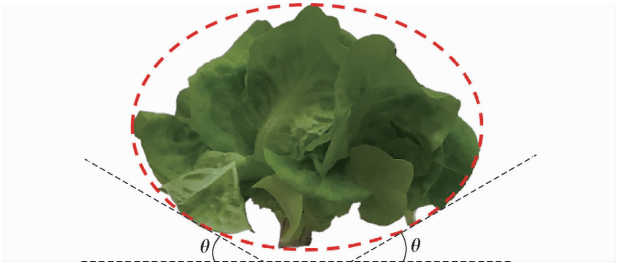


图 7 输送中水生菜形态
Fig. 7 Shape of hydroponic lettuce in transportation

水生菜末端执行器设计对异常水生菜分选效率具有直接影响。根据水生菜外部轮廓特点,提出托架式末端执行器设计方案,见图 8。该末端执行器针对生菜叶片聚拢呈一定角度的特性进行设计,对于横、纵向支撑杆,均采用分段式设计,且各段连接处均为圆滑过渡。为保证异常水生菜自动分选系统工作时的稳定性,对于横、纵向支撑杆,将两者自下向上的第 2 段支撑杆作为水生菜主要接触部分,设定第 2 段支撑杆与水平夹角为 α_i ($i = 1, 2$),其中, α_1 为纵向支撑杆角度, α_2 为横向支撑杆角度(考虑到外围叶片轮廓与水平面间夹角 θ 约为 30°,图中 2 个角度均暂取为 150°)。

为降低异常水生菜自动分选系统工作时发生水生菜损伤的风险,需对横、纵向支撑杆进行水生菜低损设计。为降低摩擦损伤,选定支撑杆组成为:直径 3 mm 的金属杆,并在外部嵌套 1 mm 厚的软质材料。其中,金属材料为 1Cr18Ni9,软质材料

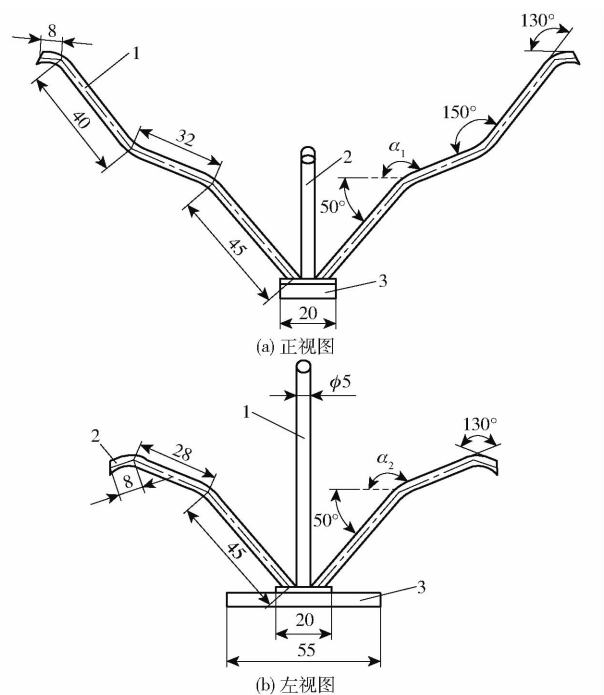


图 8 托架式末端执行器

Fig.8 End effector inbracket type

1. 纵向支撑杆 2. 横向支撑杆 3. 安装底座

为食品级硅胶(主要成分为 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)。另外,异常水培生菜分选时,为避免横、纵向支撑杆端部戳伤生菜,将横、纵支撑杆端部设计为外翻结构。

2.4.2 控制模块

异常水培生菜自动分选系统的控制模块是保证异常水培生菜分选实现自动化的首要条件。控制模块主要包括步进电机(86HS85 型)、步进电机驱动器(SW2872 型)、继电器(通灵 JQC-3FF-S-Z 型)、电磁阀(正泰 N4V210-08 型)、单片机

(Arduino UNO)等,用于控制水培生菜的检测及分选。该控制模块可实现单片机与计算机的串口通信,完成图像采集和图像分割并与分选动作执行子系统协同工作,控制步进电机和气缸的配合动作,达到分选异常水培生菜的目的。控制模块工作原理见图 9。

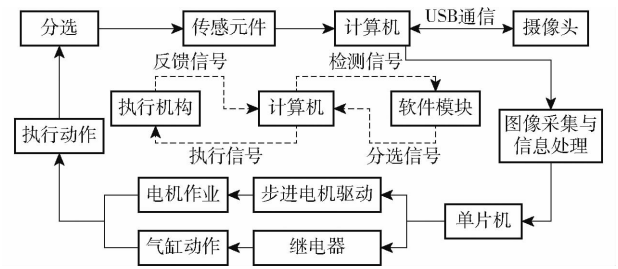


图 9 异常水培生菜自动分选系统控制模块工作原理图

Fig.9 Working principle for control model of hydroponic lettuce automatic sorting system

2.5 分选系统工作流程

分选系统工作流程见图 10。具体流程为:

- (1)水培生菜图像采集。系统供电启动,光电传感器检测到被遮挡的信号,计算机控制安装在水培生菜侧下方的 3 个摄像头进行图像采集,见图 10a。
- (2)水培生菜图像分割。将 3 个摄像头所获取图像保存于指定文件夹,计算机调用模型同时进行图像分割处理,见图 10b、10c、10d(图中分割后图像中不同颜色代表不同的类别,黑色为背景,红色为正常生菜,黄色为枯萎叶,绿色为黄叶,蓝色为腐烂叶)。随后,向单片机传送异常叶片信号。其中,如水培生菜同时含有枯萎叶、黄叶和腐烂叶,向单片机传送的异常叶片信号类型为腐烂叶。

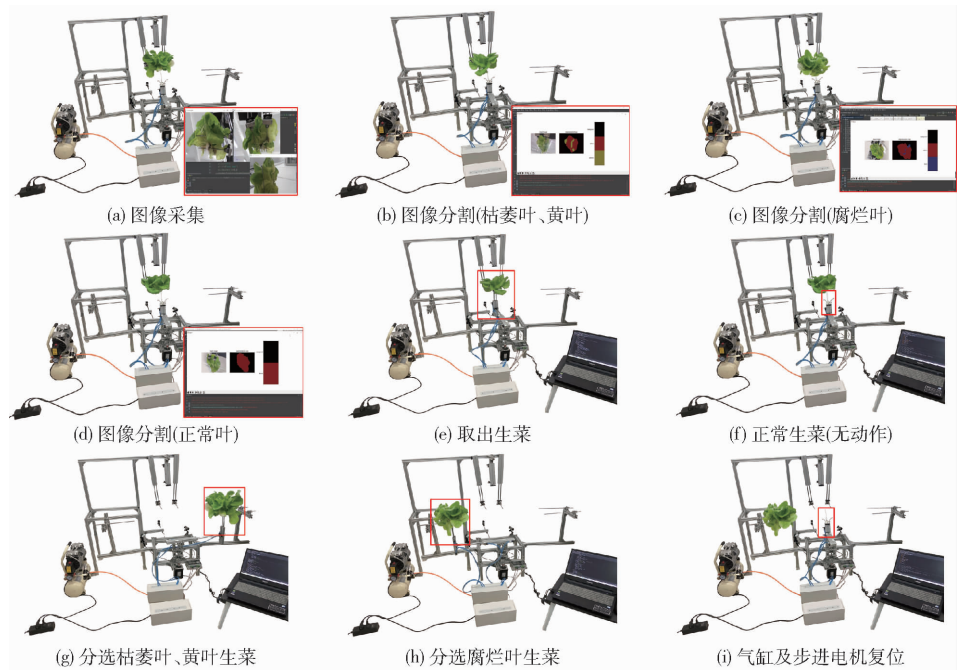


图 10 异常水培生菜自动分选系统工作流程

Fig.10 Processing of hydroponic lettuce automatic sorting system

(3)取出水生生菜。单片机接收到计算机发送的异常叶片信号后,控制推进气缸推出,托举气缸推举末端执行器,将生菜从采收运输装置处托起,完成水生生菜取出动作,见图 10e。

(4)分选动作执行子系统无动作。水生生菜正常,等待进入水生生菜包装线,见图 10f。

(5)将水生生菜放置到枯萎叶、黄叶处理包装区。末端执行器取出含有黄叶或者枯萎叶的生菜后推进气缸收缩,步进电机顺时针转动 90°,推进气缸再推出,最后托举气缸收缩,将生菜放置于枯萎叶、黄叶处理包装区,见图 10g。

(6)将水生生菜放置到腐烂生菜丢弃区。本步骤中气缸动作与上一步完全相同,但其步进电机转动方向为逆时针转动 90°,包含腐烂叶片的水生生菜被放置于丢弃区,见图 10h。

(7)气缸复位及步进电机复位。完成分选后,托举气缸先收缩然后推进气缸收缩,气缸复位;随后步进电机顺时针转动 90°,完成步进电机复位,见图 10i。

3 分选动作执行子系统参数优化试验

3.1 试验设计

依据实际分选作业工况与分选预试验结果,选取横向支撑杆角度 x_1 、纵向支撑杆角度 x_2 和步进电机转速 x_3 为试验因素,参照生菜冷藏运输技术标准 GH/T 1191—2020 规定,选定分选动作执行子系统的分选成功率 y_1 为评价指标,为排除水生生菜特征误分类所带来的误差,分选搬运动作执行过程中未发生水生生菜翻转或掉落均被判定为分选成功,分选动作执行子系统的分选成功率 y_1 为

$$y_1 = \frac{n}{N} \times 100\%$$

(1)

式中 n ——分选动作执行成功次数
 N ——单组试验重复次数

设计三因素五水平二次正交旋转组合试验^[25],每组试验重复 100 次,因素编码见表 1。

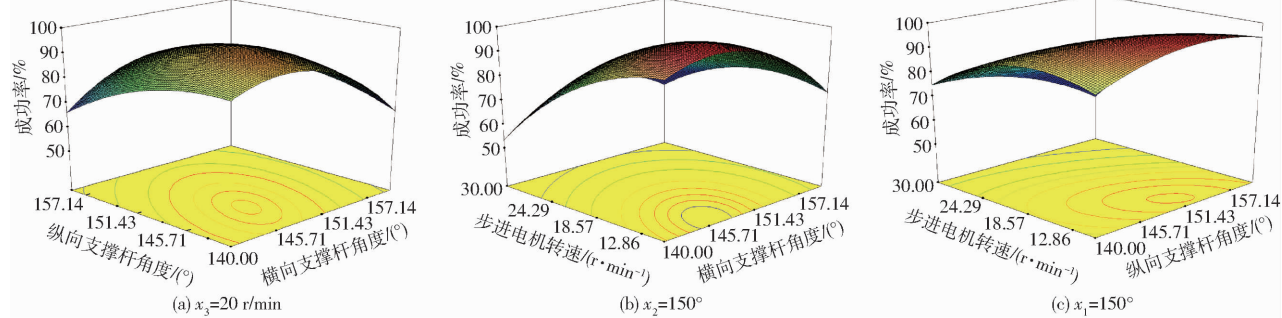


图 11 各因素对指标影响的响应曲面

Fig. 11 Response surfaces of factors on various indexes

表 1 试验因素编码
Tab. 1 Coding of test factors

编码	因素		
	横向支撑杆 角度 $x_1/(^{\circ})$	纵向支撑杆 角度 $x_2/(^{\circ})$	步进电机转速 $x_3/(r \cdot \min^{-1})$
-1.682	140	140	10
-1	144	144	14
0	150	150	20
1	156	156	26
1.682	160	160	30

3.2 试验结果分析与优化

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析,得到分选动作执行子系统的分选成功率 y_1 的回归方程,并进行显著性检验。

经试验数据分析及拟合后可知:试验整体模型极显著 ($P < 0.01$), x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_2x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 对分选动作执行子系统的分选成功率影响均显著。各因素对分选动作执行子系统的分选成功率影响的主次顺序为: x_3 、 x_2 、 x_1 。进行方差分析后可得各因素实际值对分选动作执行子系统分选成功率 y_1 影响回归方程为

$$y_1 = -2\,612.43 + 27.42x_1 + 9.20x_2 + 2.37x_3 + 0.07x_1x_2 + 0.07x_1x_3 - 0.07x_2x_3 - 0.13x_1^2 - 0.06x_2^2 - 0.09x_3^2$$

(2)

当步进电机转速为 20 r/min 时,横、纵向支撑杆角度两因素间存在交互作用,见图 11a。随横向支撑杆角度增大,分选动作执行子系统的分选成功率先提高后降低,其横向支撑杆角度较优范围为 140.00°~152.36°;纵向支撑杆角度增大,分选动作执行子系统的分选成功率先提高后降低,纵向支撑杆角度较优范围为 141.6°~151.70°。当纵向支撑杆角度一定时,随着横向支撑杆角度增大,水生生菜与横向支撑杆间的接触面积增大,横向支撑杆与水生生菜外围叶片间的贴合性随之增强。这使得水生生菜重心下移,水生生菜在分选过程中的状态趋于稳定,分选动作执行子系统的分选成功率提高。当横向支撑杆角度大于某一值

时, 水培生菜各叶片间空隙的不均性增大。在分选过程中, 当水培生菜被送至指定位置点时, 由于惯性, 水培生菜各叶片间空隙的不均性使得其难以保证稳定状态。这使得生菜在分选过程中易于发生翻转, 分选动作执行子系统的分选成功率随之降低。由于纵向支撑杆与横向支撑杆间结构尺寸的相似性, 使得纵向支撑杆角度和分选动作执行子系统的分选成功率间关系与横向支撑杆角度和分选动作执行子系统的分选成功率间关系大致相同。但在分选过程中, 相较横向支撑杆, 纵向支撑杆的“第 3 段”支撑杆部分具备较好的水培生菜收拢作用, 可降低叶片间空隙的不均性。因而, 当横向支撑杆角度一定时, 随着纵向支撑杆角度增大, 分选动作执行子系统的分选成功率虽也呈先提高后降低的趋势, 但其降低幅度较小。

当纵向支撑杆角度为 150° 时, 横向支撑杆角度与步进电机转速两因素间存在交互作用, 见图 11b。横向支撑杆角度增大, 分选动作执行子系统的分选成功率先提高后降低, 其横向支撑杆角度较优范围为 $140.00^\circ \sim 150.51^\circ$ 。当横向支撑杆角度处于低水平时, 分选动作执行子系统的分选成功率随步进电机转速的增大而降低。当横向支撑杆角度处于高水平时, 分选动作执行子系统的分选成功率随步进电机转速的增大先提高后降低, 其步进电机转速较优范围为 $10.00 \sim 15.22 \text{ r/min}$ 。当步进电机转速一定时, 随着横向支撑杆角度增大, 水培生菜与横向支撑杆间的接触面积增大, 水培生菜支撑杆与水培生菜外围叶片间的贴合性随之增强。这使得水培生菜重心下移, 水培生菜在分选过程中不易发生偏移, 分选动作执行子系统的分选成功率提高。当横向支撑杆角度大于某一值时, 水培生菜各部分叶片的质量不均性增大, 水培生菜在分选过程中极易发生抖动、翻转, 分选动作执行子系统的分选成功率随之降低。当横向支撑杆角度处于低水平时, 相较纵向支撑杆, 横向支撑杆的“第 2 段”支撑杆对水培生菜的托起作用可使水培生菜重心上移。此时, 由于横向支撑杆缺少“第 3 段”支撑杆, 其水培生菜收拢作用较差, 造成水培生菜位置状态的不稳定。随着步进电机转速增大, 水培生菜在分选作业过程中所受离心力过大, 水培生菜易发生滑动、翻转, 分选动作执行子系统的分选成功率随之降低。当横向支撑杆角度处于高水平时, 纵向支撑杆角度小于横向支撑杆角度。虽然纵向支撑杆的“第 2 段”支撑杆对水培生菜的托起作用可使水培生菜重心上移, 但纵向支撑杆的“第 3 段”支撑杆具有一定的水培生菜收拢作用。步进电机转速增大, 水培生菜与末端执行器的

软质材料间的挤压变形作用增强, 可对水培生菜产生类似手指“抓取”效果。因而, 水培生菜不易发生位移, 分选动作执行子系统的分选成功率随之提高。当步进电机转速大于某一值时, 水培生菜在分选作业过程中所受离心力过大, 离心力在支撑杆方向的分力大于水培生菜所受静摩擦力。导致水培生菜易发生滑动、翻转, 分选动作执行子系统的分选成功率随之降低。

当横向支撑杆角度为 150° 时, 纵向支撑杆角度与步进电机转速两因素间存在交互作用, 见图 11c。纵向支撑杆角度增大, 分选动作执行子系统的分选成功率先提高后降低, 纵向支撑杆角度较优范围为 $144.21^\circ \sim 158.03^\circ$ 。当纵向支撑杆角度处于低水平时, 分选动作执行子系统的分选成功率随步进电机转速的增大先提高后降低。当纵向支撑杆角度处于高水平时, 分选动作执行子系统的分选成功率随步进电机转速的增大而降低, 步进电机转速较优范围为 $10.00 \sim 16.31 \text{ r/min}$ 。步进电机转速一定时, 随着纵向支撑杆角度增大, 纵向支撑杆的“第 2 段”和“第 3 段”支撑杆与水培生菜间的接触面积增大, 纵向支撑杆与水培生菜外围叶片间的贴合性随之增强。水培生菜在分选过程中的状态随之趋于稳定, 分选动作执行子系统的分选成功率提高。当纵向支撑杆角度大于某一值时, 纵向支撑杆与水培生菜外部轮廓的贴合程度下降, 水培生菜各叶片间空隙的不均性增大。其使得分选水培生菜过程中易发生水培生菜翻转, 导致分选动作执行子系统的分选成功率降低。当纵向支撑杆角度处于低水平时, 步进电机转速增大, 横、纵支撑杆与水培生菜间的“抓取”作用效果增强。水培生菜不易发生位移, 分选动作执行子系统的分选成功率随之提高。当步进电机转速大于某一值时, 水培生菜在分选作业过程中易发生滑动、翻转, 导致分选动作执行子系统的分选成功率随之降低。当纵向支撑杆角度处于高水平时, 横向支撑杆先于纵向支撑杆“托举”水培生菜。由于横向支撑杆缺少“第 3 段”支撑杆, 导致水培生菜位置状态不稳定。随着步进电机转速增大, 水培生菜在分选作业过程中易发生滑动、翻转, 致使分选动作执行子系统的分选成功率降低。

3.3 参数优化

为获得异常水培生菜自动分选系统中分选动作执行子系统的最佳性能参数, 根据分选系统实际工作条件及分选性能要求选定优化的约束条件。利用 Design-Expert 8.0.6 软件多目标优化 (Optimization) 算法进行参数优化。目标及约束函数为

$$\begin{cases} \max y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 140^\circ \leq x_1 \leq 160^\circ \\ 140^\circ \leq x_2 \leq 160^\circ \\ 10 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 30 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

优化结果为：当横向支撑杆角度为 146°、纵向支撑杆角度为 150°、步进电机转速为 11 r/min 时，分选动作执行子系统的分选成功率为 99.27%。

4 分选装置性能试验

4.1 试验设计

根据优化结果设定异常水培生菜自动分选系统中分选动作执行子系统相关参数，此时末端执行器横向支撑杆角度为 146°，纵向支撑角度为 150°，步进电机转速设置为 11 r/min。从陕西省杨陵区杨凌现代农业创新园中随机选取水培奶油生菜 100 棵，包含不同状态叶片的水培生菜（正常生菜，包含枯萎叶或黄叶，同时包含黄叶、枯萎叶和腐烂叶的生菜）。异常水培生菜自动分选系统在进行作业时，生菜被准确判断为对应的类别，并放置到相应位置，判定分选成功。异常水培生菜自动分选系统的分选成功率 Y_1 为

$$Y_1 = \frac{n'}{N} \times 100\% \quad (4)$$

式中 n' ——生菜被准确判断为对应的类别，并成功执行分选动作次数

4.2 结果与分析

共进行 100 次分选试验，其中分选成功共计 95 次，失败 5 次（搬运失败 2 次，类别判断错误 3 次），分选动作执行子系统的分选成功率 y_1 为 98%，异常水培生菜自动分选系统的分选成功率 Y_1 为 95%。

分选失败原因主要集中在两方面：①搬运过程失败，如图 12a 所示，生菜无法平稳放置到指定位置，由于此原因失败 2 次。分析后发现此类生菜株高较大，且生菜叶片过于松散不紧致，由于托架式末端执行器柔性不足，对此类生菜的适应性有待提升，致使搬运过程中易出现生菜晃动，造成分选失败。因此，本课题组在进行下一代末端执行器设计时，将会进一步考虑改变横、纵向支撑杆材料及尺寸，以提

升末端执行器的自适应及柔性，达到提升本系统作业性能目的。②计算机进行图像分割时出现判断错误，如图 12b 所示，从而导致分选失败，由于此原因失败 3 次。分析后发现，该类生菜的异常叶片相互交叉严重，黄叶区域不明显，腐烂叶区域较少，且枯萎叶区域颜色较暗，易将枯萎叶区域分割为腐烂类。因此，后期将考虑增加模型训练的样本量，以提升图像分割模型性能。

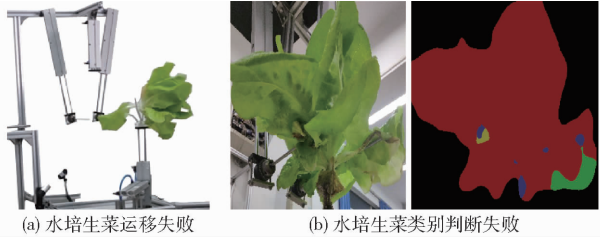


图 12 异常水培生菜分选失败示例
Fig. 12 Examples of abnormal hydroponic lettuce sorting failure

5 结论

（1）设计了一种异常水培生菜自动分选系统，该装置综合利用深度学习、串口通信、自动控制等相关技术，可实现异常水培生菜的识别和分选。

（2）依据水培生菜异常叶片分布特点，采用自下向上的三摄像头配合拍摄方式进行图像采集。

（3）根据水培生菜外部轮廓特点，设计了异常水培生菜分选动作执行子系统。

（4）基于 ResNet-101 的 DeepLabV3+ 模型建立水培生菜异常叶片分割模型，其平均联合交并比达 83.26%，像素精度为 99.24%，单幅图像处理时间为 (193.4 ± 4) ms，满足分选装置的识别性能要求。

（5）建立各因素与指标间回归数学模型，结合水培生菜分选实际需求，获得异常水培生菜分选动作执行系统最优参数组合为：横向支撑杆角度 146°、纵向支撑杆角度 150°、步进电机转速 11 r/min。

（6）通过台架试验验证了优化结果的准确性，并确定异常水培生菜自动分选系统的分选成功率可达 95%，满足当前自动采收装置的生产要求。

参 考 文 献

[1] ZHANG Yubin, ZHA Lingyan, LIU Wenke, et al. Led light quality of continuous light before harvest affects growth and as a metabolism of hydroponic lettuce grown under increasing doses of nitrogen[J]. Plants, 2021, 10(1): 176.

[2] THIJS V G, CHRISTOPHE E N, STEFANIA D P, et al. Root-associated bacterial community shifts in hydroponic lettuce cultured with urine-derived fertilizer[J]. Microorganisms, 2021, 9(6): 1326.

[3] 马义东, 徐灿, 崔永杰, 等. 水培生菜整株低损收获装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 162-169.

MA Yidong, XU Can, CUI Yongjie, et al. Design and test of harvester for whole hydroponic lettuce with low damage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 162-169. (in Chinese)

- [4] LEE E, ROUT P R, BAE J. The applicability of anaerobically treated domestic wastewater as a nutrient medium in hydroponic lettuce cultivation: nitrogen toxicity and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: 146482.
- [5] 马义东, 王明辉, 崔永杰, 等. 水培生菜自动纵向包装装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 113–121.
MA Yidong, WANG Minghui, CUI Yongjie, et al. Design and test of automatic machine for hydroponic lettuce longitudinal packaging[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 113–121. (in Chinese)
- [6] 张颖琦, 沈俊毅, 徐映如, 等. 亚硝酸盐对人体的危害及检测方法的进展[J]. *职业与健康*, 2015, 31(6): 851–855.
ZHANG Yingqi, SHEN Junyi, XU Yingru, et al. Harm of nitrite to human body and progress on test methods[J]. *Occup and Health*, 2015, 31(6): 851–855. (in Chinese)
- [7] 赵静, 王娜, 冯叙桥, 等. 蔬菜中硝酸盐和亚硝酸盐检测方法的研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(8): 42–49.
ZHAO Jing, WANG Na, FENG Xuqiao, et al. Advances in detection methods for nitrate and nitrite in vegetables[J]. *Food Science*, 2014, 35(8): 42–49. (in Chinese)
- [8] 闫潇娟, 严丽君, 胡雪峰, 等. 蔬菜生长与储藏过程中硝酸盐和亚硝酸盐含量变化[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2015, 21(1): 81–87.
YAN Xiaojuan, YAN Lijun, HU Xuefeng, et al. Variations of nitrate and nitrite contents in vegetables during growth and storage[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2015, 21(1): 81–87. (in Chinese)
- [9] SOFU M M, ER O, KAYACAN M C, et al. Design of an automatic apple sorting system using machine vision[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2016, 127: 395–405.
- [10] 孟繁佳, 罗石, 孙红, 等. 玉米种子实时检测分选装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(3): 153–159, 177.
MENG Fanjia, LUO Shi, SUN Hong, et al. Design and experiment of real-time detection and sorting device for maize seeds [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 153–159, 177. (in Chinese)
- [11] DENG Limiao, LI Juan, HAN Zhongzhi. Online defect detection and automatic grading of carrots using computer vision combined with deep learning methods[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2021, 149: 111832.
- [12] 赵博, 王烨, 董鑫, 等. 苏叶在线分选系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(6): 156–162, 172.
ZHAO Bo, WANG Ye, DONG Xin, et al. Design and experiment of online sorting system for perilla[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(6): 156–162, 172. (in Chinese)
- [13] WU Zhenchao, YANG Ruizhe, GAO Fangfang, et al. Segmentation of abnormal leaves of hydroponic lettuce based on DeepLabV3+ for robotic sorting[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 190: 106443.
- [14] 赵世达, 王树才, 白宇, 等. 基于生成对抗网络与 ICNet 的羊骨架图像实时语义分割[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 329–339.
ZHAO Shida, WANG Shucai, BAI Yu, et al. Real-time semantic segmentation of sheep skeleton image based on generative adversarial network and ICNet[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 329–339. (in Chinese)
- [15] 刘文萍, 赵磊, 周焱, 等. 基于深度学习的无人机土地覆盖图像分割方法[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2): 221–229.
LIU Wenping, ZHAO Lei, ZHOU Yan, et al. Deep learning based unmanned aerial vehicle landcover image segmentation method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 221–229. (in Chinese)
- [16] ABDALLA A, CEN Haiyan, WAN Liang, et al. Fine-tuning convolutional neural network with transfer learning for semantic segmentation of ground-level oilseed rape images in a field with high weed pressure[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 167: 105091.
- [17] GAO Fangfang, FU Longsheng, ZHANG Xin, et al. Multi-class fruit-on-plant detection for apple in SNAP system using Faster R-CNN[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 176: 105634.
- [18] NASIRI A, OMID M, TAHERI-GARAVAND A. An automatic sorting system for unwashed eggs using deep learning[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 283(4): 110036.
- [19] SUO Rui, GAO Fangfang, ZHOU Zhongxian, et al. Improved multi-classes kiwifruit detection in orchard to avoid collisions during robotic picking[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 182: 106052.
- [20] SONG Zhenzhen, ZHOU Zhongxian, WANG Wenqi, et al. Canopy segmentation and wire reconstruction for kiwifruit robotic harvesting[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 181: 105933.
- [21] WANG Jing, LIU Xiuping. Medical image recognition and segmentation of pathological slices of gastric cancer based on DeepLabV3+ neural network[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2021, 207: 106210.
- [22] LIU Man, FU Bolin, XIE Shuyu, et al. Comparison of multi-source satellite images for classifying marsh vegetation using DeepLabV3 plus deep learning algorithm[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107562.
- [23] ZHANG Dongyan, DING Yang, CHEN Pengfei, et al. Automatic extraction of wheat lodging area based on transfer learning method and DeepLabV3+ network[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 179: 105845.
- [24] SHEN Chen, LIU Liantao, ZHU Lingxiao, et al. High-throughput in situ root image segmentation based on the improved DeepLabV3+ method[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 576791.
- [25] 王立军, 张传根, 丁振军. 玉米收获机清选筛体结构优化[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 108–114.
WANG Lijun, ZHANG Chuangen, DING Zhenjun. Structure optimization of cleaning screen for maize harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 108–114. (in Chinese)