

水培生菜低损柔性采收装置设计与试验

马义东 胡鹏展 金鑫 李心平 张超 张印

(河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003)

摘要: 植物工厂水培生菜采收过程中易损伤菜叶,为提升采收质量,结合水培生菜农艺特征,设计了一款水培生菜低损柔性采收装置。利用图像处理检测水培生菜轮廓外切矩形,获取生菜株高及菜叶展开尺寸,进而通过柔性手指对菜叶的低损抓取、切割器对生菜茎的一次切除,实现水培生菜低损柔性采收。分析确定了柔性抓取机构、切茎机构、控制系统等关键部件的作业流程及结构参数。利用响应曲面试验方法,优化了柔性手指抓取高度比、抓取圆周比、柔性手指弯曲角的参数组合。试验结果表明,各因素影响采收成功率的显著性顺序为柔性手指弯曲角、抓取圆周比、抓取高度比,各因素对菜叶损伤面积的影响均极显著。利用二次拟合方程求得最优参数组合为抓取高度比0.55、抓取圆周比0.76、柔性手指弯曲角39.7°。对最优参数组合进行试验验证,结果表明,菜叶损伤面积为186 mm²,采收成功率为96%,实现了水培生菜低损柔性采收。

关键词: 水培生菜; 柔性采收; 低损伤; 植物工厂

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0175-09 **OSID:** 

Design and Experiment of Low Damage Flexible Harvesting Device for Hydroponic Lettuce

MA Yidong HU Pengzhan JIN Xin LI Xinping ZHANG Chao ZHANG Yin

(College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: The leaves of hydroponic lettuce were easy to damage during the process of harvesting in the plant factory, to improve the harvesting quality for hydroponic lettuce, a flexible harvester with low damage was designed and manufactured combined with the agricultural technology of hydroponic lettuce. To realize flexible harvesting with low damage for hydroponic lettuce, image processing was used to detect the outer rectangle of hydroponic lettuce contour, and the plant height and leaf expansion size of lettuce were obtained. The lettuce leaves were grabbed by flexible fingers, and then the lettuce stem was removed by the cutting device. The working process and structure parameters of flexible grabbing device, stem cutting device, and control system were analyzed. The parameters combination of grabbing height ratio, grabbing diametrical ratio, and bending angle for flexible fingers were optimized by using response surface methodology. The optimizing test results showed that the order of significance for harvesting success rate was bending angle, grabbing diametrical ratio, grabbing height ratio, and the single factors had highly significant influence on the leaves damage area. The optimized combination of factors was solved by quadratic fitting function, and the value of grabbing height ratio, grabbing diametrical ratio and bending angle were 0.55, 0.76, 39.7°, respectively. The verification test showed that the leaves damage area was 186 mm², and the harvesting success rate was 96% under the optimized combination, which meant the low damage harvesting for hydroponic lettuce was realized.

Key words: hydroponic lettuce; flexible harvesting; low damage; plant factory

0 引言

植物工厂是设施园艺的高级形式,水培生菜是

植物工厂主要栽培作物,采收是植物工厂水培生菜的重要生产环节。水培生菜的菜叶柔嫩易损伤,低损伤采收是机械作业的难点;为适应植物工厂无人

化作业的发展趋势,研发水培生菜高质量(低损伤、高成功率等)采收装备具有重要意义。

目前,植物工厂发展迅速,相关作业装备需求日益增加^[1-10]。国外,日本等国家植物工厂作业装备的研发起步较早^[11-16],其采收装备多采用圆盘刀直接切割生菜茎(不聚拢菜叶)^[12],作业效率高,但对农艺规范等要求较高。国内,水培叶菜采收装备尚处于研发阶段,且农艺条件不统一;因此,国内采收装备作业时,一般先从生菜底部或侧面聚拢菜叶,再切除生菜茎^[17-21];菜叶聚拢部件多采用夹持板^[17-18]、聚拢杆^[19-21]等刚性构件,相关研究集中于采收机构参数优化。上述研究为植物工厂高质量采收装备研发提供了良好基础,但刚性聚拢部件仍易损伤柔嫩菜叶,不满足商业生产要求。柔性抓取构件因其软体气动等作业特点,对降低采收抓取损伤具有显著优势,近年相关研究多针对番茄等果菜^[22-25],适用于水培生菜等散叶蔬菜的柔性采收装备设计及参数优化,尚未见报道。

本文面向植物工厂水培生菜高质量采收需求,设计一款低损柔性采收装置并开发样机,利用响应曲面试验优化水培生菜抓取高度比、抓取圆周比、柔性手指弯曲角3个关键作业参数,以降低生菜损伤并提升采收成功率。

1 整机结构与工作原理

1.1 农艺特征分析

图1为植物工厂水培生菜农艺特征,生菜种植于定植板,常用行距、株距分别为200、180 mm。生菜底部菜叶贴于定植板、相邻生菜间的菜叶存在重叠,从生菜底部或侧面聚拢菜叶,采收作业空间不足且易损伤菜叶。因此,本文提出一种从顶部柔性抓取生菜的低损采收新方法。

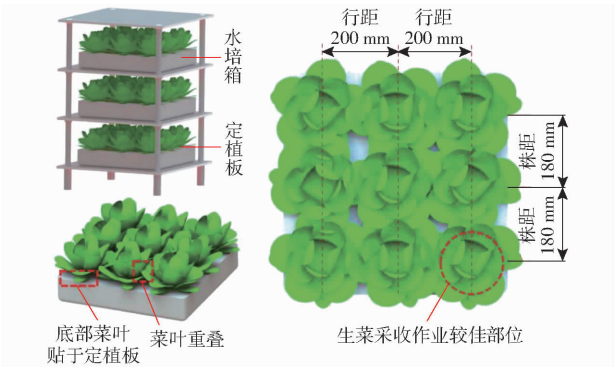


图1 水培生菜农艺特征

Fig. 1 Agricultural technology of hydroponic lettuce

1.2 整机结构

结合水培生菜农艺特征,设计了一款单株水培生菜柔性采收装置(图2),其主要由柔性抓取机构、

切茎机构(切割器、切割器伸缩气缸等)、机械臂、定植板输送机构、图像采集相机、控制系统等组成。水培生菜运送至图像采集位置后,光电传感器触发拍照,经图像处理获取生菜株高和菜叶展开尺寸;随后生菜运送至待采收位置,柔性抓取机构根据生菜株高和菜叶展开尺寸,自动调节柔性手指抓取高度和抓取直径,并从生菜顶部抓取菜叶;为避免切割器直接伸出造成菜叶切伤,生菜茎切割流程设置为“生菜提升—切割器伸出生菜下降—切茎”;切茎后生菜被横向输送至收集区,完成采收。

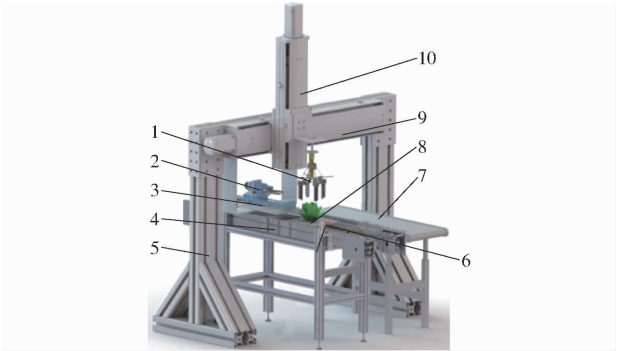


图2 水培生菜柔性采收装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of hydroponic lettuce flexible harvester

1. 柔性抓取机构 2. 切割器 3. 切割器伸缩气缸 4. 定植板输送机构 5. 机架 6. 图像采集相机 7. 收集传送带 8. 光电传感器 9、10. 二自由度机械臂

1.3 工作原理

通过4根柔性手指对顶部菜叶的低损抓取、切割器对生菜茎的一次性切除,实现水培生菜低损柔性采收(图3)。为提升生菜抓取稳定性和成功率,柔性手指先以负压状态接近生菜顶部(图3a),再以正压状态抓取并提升生菜;随后,切割器从生菜侧面切除生菜茎(图3b)。

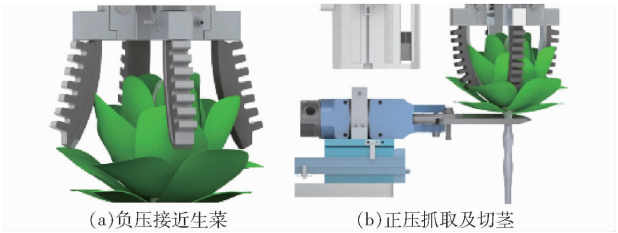


图3 水培生菜柔性采收装置作业原理图

Fig. 3 Principle diagrams for hydroponic lettuce flexible harvester

2 关键部件设计

2.1 柔性抓取机构

柔性抓取机构(图4a)是水培生菜采收装置核心部件,主要由柔性手指、连接板、丝杠-滑块、连杆、直线导轨、直线滑块等组成;柔性手指安装在直线滑

块上,由步进电机驱动丝杠,自动调节柔性手指抓取直径。柔性手指软体部分为橡胶材质,其弯曲方向由气压形式(正压或负压)决定,气压影响柔性手指端部竖直位移、水平位移、弯曲角等参数(图 4b,点 M 为柔性手指起始点,点 N 为柔性手指端点,点 O 为弧 MN 在点 M 、 N 切线的交点, h_z 为正压下柔性手指端点竖直位移, l_z 为正压下柔性手指端点水平位移, h_f 为负压下柔性手指端点竖直位移, l_f 为负压下柔性手指端点水平位移, θ_i 为柔性手指弯曲角)。通过预试验,柔性手指长、宽、厚分别为 140、25、30 mm。

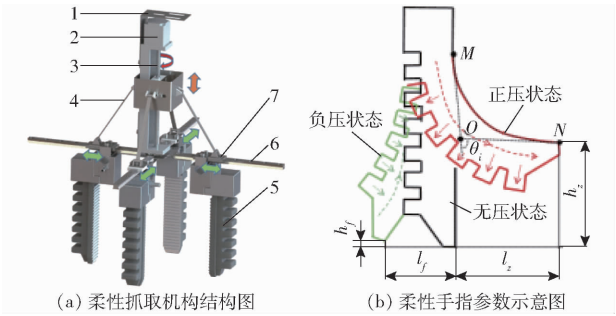


图 4 柔性抓取机构结构及柔性手指参数示意图

Fig. 4 Flexible grabbing device structure and flexible finger parameters

1. 连接板 2. 步进电机 3. 丝杠-滑块 4. 连杆 5. 柔性手指
6. 直线导轨 7. 直线滑块

图 5 为正负气压对柔性手指参数的影响,柔性手指参数(图 4b)通过在方格纸上描绘手指的弯曲

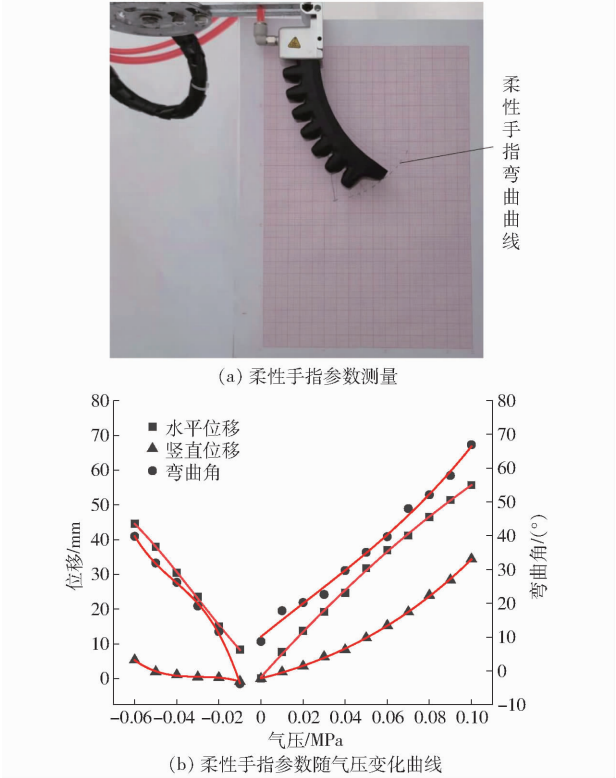


图 5 正负气压对柔性手指参数的影响
Fig. 5 Influence of positive and negative pressures on flexible finger parameters

曲线进行测量(图 5a),柔性手指参数随气压变化曲线如图 5b 所示。经预试验确定:抓取过程中,柔性手指负压状态下的弯曲角为 26.5° ,柔性手指正压抓取状态下的弯曲角范围为 $22.6^{\circ} \sim 48.0^{\circ}$ 。后续采收响应曲面试验中,正压状态下柔性手指弯曲角通过气压进行调节,柔性手指参数与气压拟合方程如表 1 所示。

表 1 柔性手指参数与气压拟合方程
Tab. 1 Fitting functions between flexible finger parameters and air pressure

拟合方程	R^2	RMSE
$l_z = -1\,222.00x^2 + 674.70x + 0.43$	0.999 5	0.562 9 mm
$h_z = 5\,701.00x^3 + 1\,335.00x^2 + 151.60x + 0.07$	0.999 6	0.261 2 mm
$l_f = -956.00x^2 - 800.70x + 0.62$	0.999 5	0.457 1 mm
$h_f = -4.89 \times 10^4 x^3 - 1\,887.00x^2 - 26.96x - 0.27$	0.956 0	0.603 2 mm
$\theta_z = 9.9 \times 10^5 x^3 - 5\,387.00x^2 + 740.80x + 6.70$	0.990 0	2.291 0 $^{\circ}$
$\theta_f = 5.00 \times 10^4 x^3 + 369.00x^2 - 974.60x - 9.97$	0.989 9	2.086 0 $^{\circ}$

注: x 为柔性手指气压, θ_z 为正压下柔性手指弯曲角, θ_f 为负压下柔性手指弯曲角。

2.2 切茎机构

切茎机构需精准切除生菜茎(茎长 8 ~ 16 mm),作业流程如图 6a 所示,为避免切割器切伤生菜底部菜叶,切割器伸出前,先将生菜提升 180 mm。切割器由气缸驱动,其作业原理如图 6b 所示,活塞杆拉力 F_1 主要由气缸输入气压决定,计算方程为

$$F_1 = p \frac{(D^2 - d^2) \pi}{4}$$

(1)

- 式中 p ——气缸输入气压,MPa
 D ——气缸直径,取 25 mm
 d ——活塞杆直径,取 10 mm

输入气压后,气缸活塞杆带动刀片连杆运动,进而完成切茎,剪切力计算方程为

$$F_2 = \frac{F_1 l_1 \cos(\alpha_2 - 90^{\circ})}{l_2 \cos(\alpha_1 - 90^{\circ})}$$

(2)

- 式中 F_2 ——剪切力,N
 l_1 ——动力臂长度,取 38 mm
 l_2 ——阻力臂长度,取 58 mm
 α_1 ——活塞杆与连杆夹角, $(^{\circ})$
 α_2 ——刀片与连杆夹角, $(^{\circ})$

生菜茎所需剪切力约 40 N^[26],在气缸输入气压为 0.4 MPa 时,活塞杆拉力 F_1 约 294 N,剪切力 F_2 约 182 N,满足生菜根茎剪切力要求,预试验中切割器均能切除生菜茎。

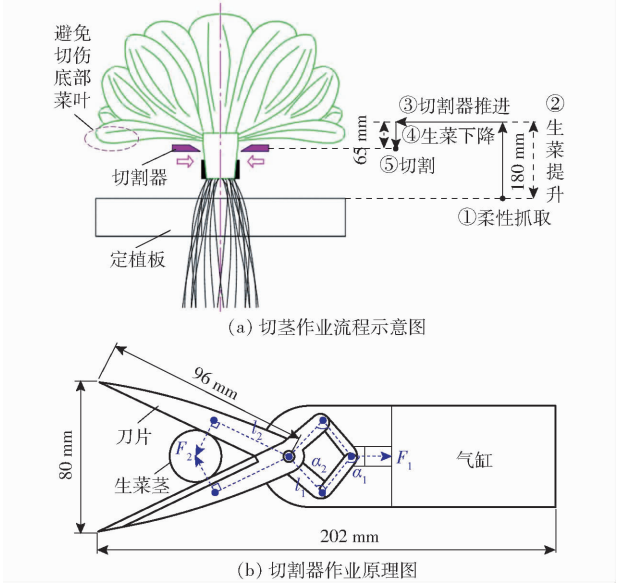


图 6 切茎流程及切割器作业原理图

Fig. 6 Stem-cutting workflow and cutter working principle

2.3 二自由度机械臂

图 7 为采收装置二自由度机械臂结构示意图。丝杠由伺服电机驱动,横向机械臂行程 1 700 mm,竖直机械臂行程 1 200 mm。

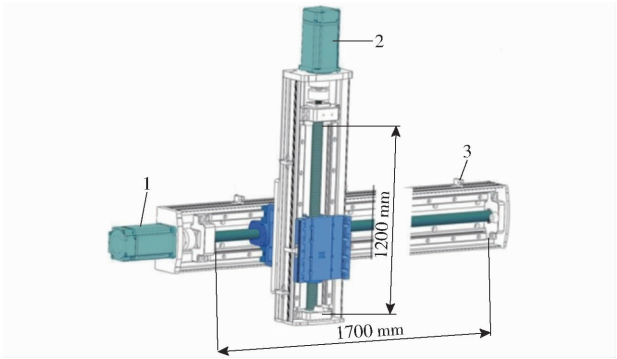


图 7 二自由度机械臂结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of two-degree mechanical arm

1. 横向伺服电机 2. 竖直伺服电机 3. 限位传感器

2.4 控制系统

控制系统由上位机和下位机组成(图 8),上位机获取生菜株高及菜叶展开尺寸后,进而下位机控制生菜抓取、切茎等作业。

上位机主要对生菜图像进行采集和处理:光电传感器触发采集生菜原始图像(图 9a);为降低干扰,经高斯滤波、灰度化和阈值分割等预处理,得到二值化图像(图 9b);对二值化图像进行二次滤波平滑处理,然后进行边缘检测、开运算和闭运算,以平滑生菜轮廓(图 9c);调用 Opencv 中的 boundingRect 函数,检测生菜轮廓外切矩形,并根据像素标定结果计算出生菜株高和菜叶展开尺寸(图 9d);上述图像处理时间为 2.6 s,测量误差 3.3%。

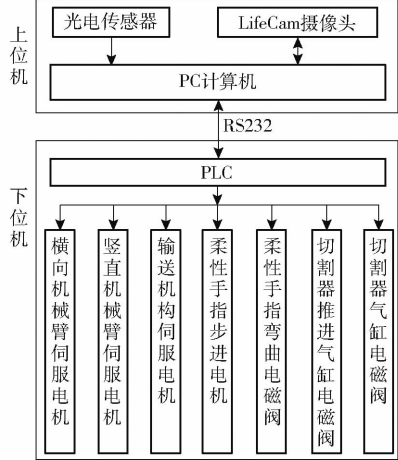


图 8 控制系统构成框图

Fig. 8 Diagram of control system structure

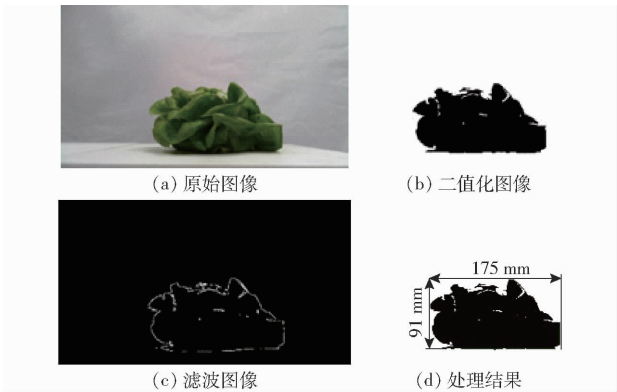


图 9 图像处理过程

Fig. 9 Image processing process

上位机获取生菜株高和菜叶展开尺寸后,通过 RS232 通讯串口将测量结果发送下位机 PLC (信捷 XD5-32T4-E 型),执行后续采收作业,控制系统电气原理如图 10 所示。

3 Box – Behnken 试验

3.1 试验装置与材料

为优化采收作业参数,研制水培生菜柔性采收装置(图 11)。试验材料选取植物工厂应用最广的奶油生菜(图 12),共 275 株(255 株用于响应曲面试验,20 株用于验证试验),生菜株高 70 ~ 110 mm,菜叶展开尺寸 170 ~ 220 mm,切茎后生菜质量 100 ~ 139 g。

3.2 试验方法

为提升采收装置作业质量(提升采收成功率、降低菜叶损伤),采用响应曲面 Box – Behnken 试验方法(共 17 组试验)对柔性手指作业参数进行试验优化。

3.2.1 试验因素

为减少生菜尺寸差异对试验结果的影响,选取柔性手指抓取高度比(抓取高度比为 h_1/h , h 为生菜

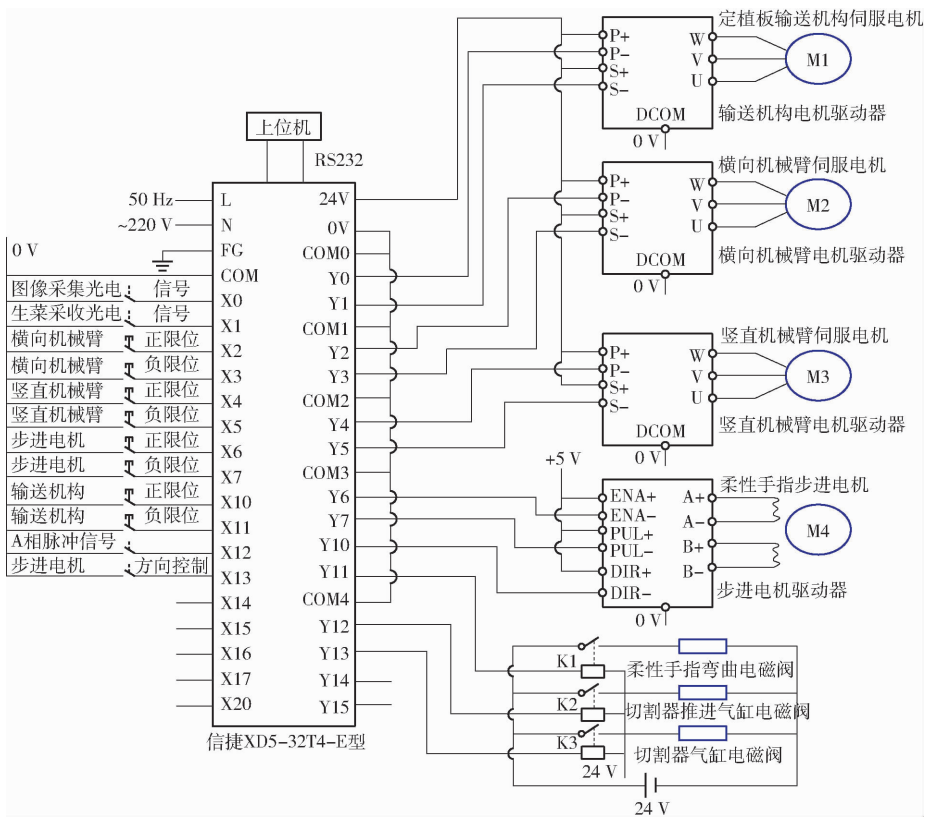


图 10 控制系统电气原理图

Fig. 10 Electrical schematic of control system

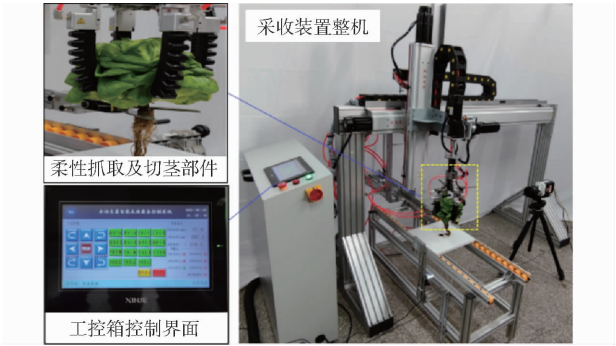


图 11 水培生菜柔性采收装置

Fig. 11 Flexible harvesting device

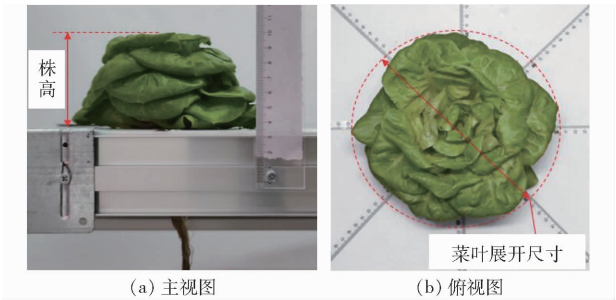


图 12 水培奶油生菜

Fig. 12 Naiyou variety of hydroponic lettuce

高度、 h_1 为柔性手指抓取高度,图 13a)、抓取圆周比(抓取圆周比为 d_2/d_1 , d_1 为菜叶展开尺寸、 d_2 为柔性手指抓取直径,图 13b)及柔性手指弯曲角(图 4b),共 3 个试验因素。

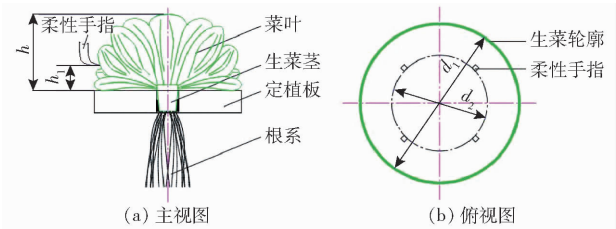


图 13 水培生菜抓取参数示意图

Fig. 13 Hydroponic lettuce grabbing parameters

预试验确定 3 个试验因素的水平范围为:抓取高度比 0.45 ~ 0.65、抓取圆周比 0.65 ~ 0.85、柔性手指弯曲角 22.6° ~ 48.0°;Box - Behnken 试验因素编码如表 2 所示。

表 2 因素编码

Tab. 2 Coding of factors

编码	因素		
	抓取高度比	抓取圆周比	柔性手指弯曲角
	X_1	X_2	$X_3/(^{\circ})$
-1	0.45	0.65	22.6
0	0.55	0.75	35.3
1	0.65	0.85	48.0

根据 Box - Behnken 试验的因素水平组合,开展试验,主要步骤如下:调节采收装置,保证柔性抓取机构与水培生菜同心同轴。手动调节柔性手指弯曲角,根据表 1 拟合方程,确定柔性手指端点水平位移

l_2 及柔性手指端点竖直位移 h_2 (图4b)。计算机通过图像处理获取菜叶展开尺寸和株高。调节抓取圆周比:结合菜叶展开尺寸与 l_2 ,自动调节柔性手指抓取直径(柔性手指抓取直径范围110~187 mm;柔性手指安装直径范围148~269 mm),如图14所示。调节抓取高度比:结合生菜株高与 h_2 ,自动调节柔性手指抓取高度。试验并记录结果。

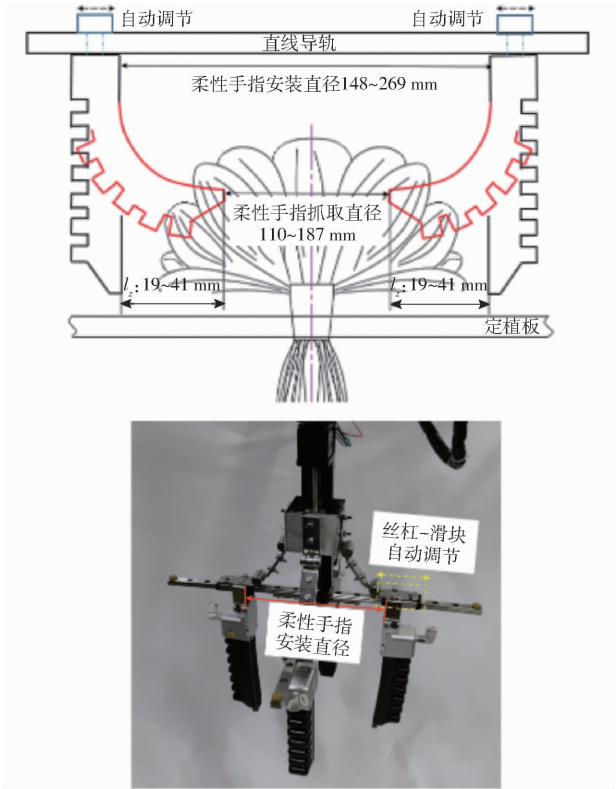


图14 柔性手指抓取直径调节示意图

Fig. 14 Grabbing diameter adjustment for flexible fingers

3.2.2 试验指标

试验指标为采收成功率 Y_1 和菜叶损伤面积 Y_2 。测试采收成功率时,每组试验重复100次(每株生菜重复使用10次);柔性手指将水培生菜稳定抓取至切茎位置,视为采收成功。测试菜叶损伤面积时,每组重复5次(取平均值作为每组试验的结果);菜叶损伤面积指切茎后单株生菜上所有菜叶的损伤面积之和,通过对每片菜叶进行品红染色、人工提取损伤等步骤^[20]测量(图15)。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 试验结果

表3为响应曲面Box-Behnken试验结果。利用Design-Expert 8.0.6软件,获得采收成功率 Y_1 与各因素编码值(x_1 、 x_2 、 x_3)的二次拟合方程为

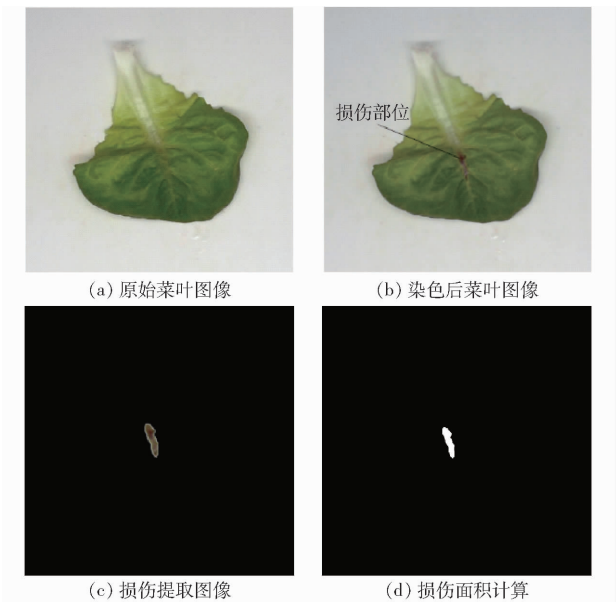
$$Y_1 = 0.94 - 0.06x_1 - 0.06x_2 + 0.10x_3 + 0.02x_1x_2 - 5 \times 10^{-3}x_2x_3 - 0.03x_1^2 - 0.02x_2^2 - 0.08x_3^2 \quad (3)$$


图15 菜叶损伤面积测量

Fig. 15 Measuring for leaves damage area

表3 试验设计与结果

Tab. 3 Experimental design and results

序号	因素			$Y_1/\%$	Y_2/mm^2
	X_1	X_2	$X_3/(\text{^\circ})$		
1	0.55	0.85	22.6	68	132
2	0.55	0.75	35.3	96	170
3	0.45	0.65	35.3	100	394
4	0.65	0.85	35.3	80	159
5	0.65	0.65	35.3	90	227
6	0.55	0.75	35.3	94	198
7	0.45	0.75	48.0	100	368
8	0.55	0.75	35.3	92	191
9	0.55	0.65	22.6	78	174
10	0.55	0.85	48.0	88	167
11	0.55	0.65	48.0	100	354
12	0.45	0.75	22.6	82	149
13	0.55	0.75	35.3	94	196
14	0.45	0.85	35.3	84	169
15	0.65	0.75	48.0	84	156
16	0.55	0.75	35.3	92	185
17	0.65	0.75	22.6	66	136

对采收成功率进行方差分析,如表4所示。模型 P 值为0.0002,小于0.05;失拟项 P 值为0.0648,大于0.05;表明该模型具有统计学意义。由表4可知,各单因素影响采收成功率的显著性顺序为:柔性手指弯曲角 X_3 、抓取圆周比 X_2 、抓取高度比 X_1 。

利用Design-Expert 8.0.6软件,获得菜叶损伤面积 Y_2 与各因素编码值的二次拟合方程为

$$Y_2 = 188.00 - 50.25x_1 - 65.25x_2 + 56.75x_3 + 39.25x_1x_2 - 49.75x_1x_3 - 36.25x_2x_3 + 22.38x_1^2 + 26.87x_2^2 - 8.12x_3^2 \quad (4)$$

表 4 采收成功率方差分析

Tab. 4 Analysis of variance for harvesting success rate					
方差来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	0.17	9	0.018	22.16	0.000 2
X_1	0.026	1	0.026	31.81	0.000 8
X_2	0.029	1	0.029	34.64	0.000 6
X_3	0.076	1	0.076	91.47	<0.000 1
X_1X_2	9.00×10^{-4}	1	9.00×10^{-4}	1.08	0.332 7
X_1X_3	5.56×10^{-7}	1	5.56×10^{-7}	6.68×10^{-14}	1.000 0
X_2X_3	1.00×10^{-4}	1	1.00×10^{-4}	0.12	0.738 9
X_1^2	3.30×10^{-3}	1	3.30×10^{-3}	3.97	0.086 6
X_2^2	2.23×10^{-3}	1	2.23×10^{-3}	2.68	0.145 7
X_3^2	0.03	1	0.026	30.81	0.000 9
失拟项	4.70×10^{-3}	3	1.57×10^{-3}	5.60	0.064 8
纯误差	1.12×10^{-3}	4	2.80×10^{-4}		
总和	0.17	16			

对菜叶损伤面积进行方差分析,如表 5 所示。

表 5 菜叶损伤面积方差分析

Tab. 5 Analysis of variance for leaves damage area					
方差来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1.07×10^5	9	11 877.54	60.34	<0.000 1
X_1	20 200.50	1	20 200.50	102.62	<0.000 1
X_2	34 060.50	1	34 060.50	173.02	<0.000 1
X_3	25 764.50	1	25 764.50	130.88	<0.000 1
X_1X_2	6 162.25	1	6 162.25	31.30	0.000 8
X_1X_3	9 900.25	1	9 900.25	50.29	0.000 2
X_2X_3	5 256.25	1	5 256.25	26.70	0.001 3
X_1^2	2 107.96	1	2 107.96	10.71	0.013 6
X_2^2	3 041.12	1	3 041.12	15.45	0.005 7
X_3^2	277.96	1	277.96	1.41	0.273 5
失拟项	872.00	3	290.67	2.30	0.219 4
纯误差	506.00	4	126.50		
总和	1.08×10^5	16			

模型 *P* 值小于 0.000 1,小于 0.05;失拟项 *P* 值为 0.214 9,大于 0.05;表明该模型具有统计学意义。由表 5 可知,抓取高度比 X_1 、抓取圆周比 X_2 、柔性手指弯曲角 X_3 的 *P* 值均小于 0.000 1,说明各单因素对菜叶损伤面积的影响均极显著。

3.3.2 双因素交互作用响应曲面分析

图 16 为双因素交互作用对采收成功率的影响。如图 16a 所示,当柔性手指弯曲角 X_3 一定时,随着抓取高度比 X_1 的减小,采收成功率增大;随着抓取圆周比 X_2 的减小,采收成功率增大;在抓取高度比 X_1 小于 0.50 且抓取圆周比 X_2 小于 0.70 的区域内,采收成功率均达到 100%;当抓取高度比 X_1 和抓取圆周比 X_2 较大时,柔性手指对水培生菜的夹持力分布于生菜上部及外侧,生菜不易抓取,造成采收失败(图 17a)。如图 16b 所示,当抓取圆周比 X_2 一定时,随着抓取高度比 X_1 的减小,采收成功率增大;随着柔性手指弯曲角 X_3 增大,采收成功率先增大后减小;在抓取高度比 X_1 小于 0.50 且柔性手指弯曲角 X_3 大于 40.0°的区域内,采收成功率均为 100%;当抓取圆周比 X_2 较大且柔性手指弯曲角 X_3 较小时,柔性手指对水培生菜的夹持力较小,生菜不易被提起,造成采收失败(图 17b)。如图 16c 所示,当抓取高度比 X_1 一定时,随着抓取圆周比 X_2 的减小,采收成功率增大;随着柔性手指弯曲角 X_3 增大,采收成功率先增大后减小;在抓取圆周比 X_2 小于 0.70 且柔性手指弯曲角 X_3 大于 40.0°的区域内,采收成功率均达到 100%;当抓取圆周比 X_2 较大且柔性手指弯曲角 X_3 较小时,柔性手指与菜叶间摩擦力较小,生菜提起过程中易脱落,造成采收失败(图 17c)。

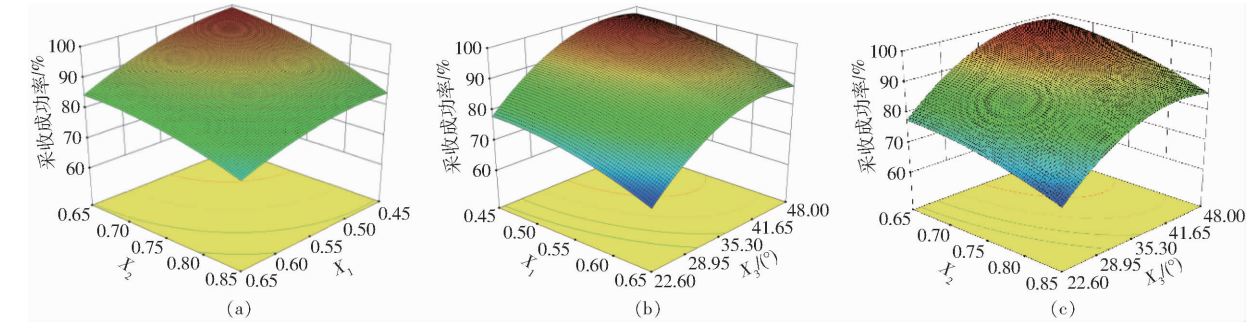


图 16 双因素交互作用与采收成功率的响应曲面
Fig. 16 Response surfaces for double factors and harvesting success rate

图 18 为双因素交互作用对菜叶损伤面积的影响。如图 18a 所示,当柔性手指弯曲角 X_3 一定时,随着抓取圆周比 X_2 的增大,菜叶损伤面积减小;随着抓取高度比 X_1 的增大,菜叶损伤面积减小。如图 18b 所示,当抓取圆周比 X_2 一定时,随着抓取高度比 X_1 的增大,菜叶损伤面积减小;随着柔性手指

弯曲角 X_3 的减小,菜叶损伤面积减小。如图 18c 所示,当抓取高度比 X_1 一定时,随着抓取圆周比 X_2 的增大,菜叶损伤面积减小;随着柔性手指弯曲角 X_3 的减小,菜叶损伤面积减小。

3.3.3 最优参数组合求解

为提高采收成功率、降低菜叶损伤面积,利用

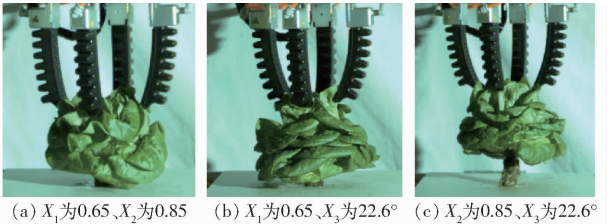


图 17 采收失败案例
Fig. 17 Harvest failure cases

Design-Expert 软件求解最优参数组合;经预试验分

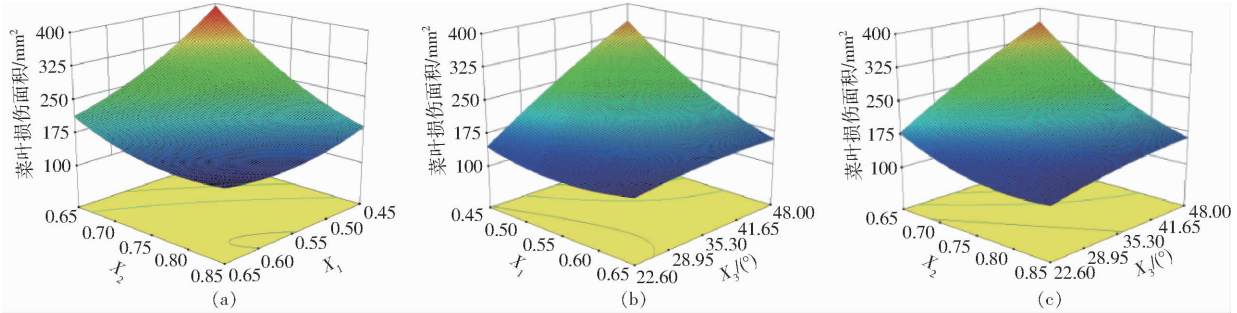


图 18 双因素交互作用与菜叶损伤面积的响应曲面
Fig. 18 Response surfaces for double factors and leaves damage area

利用 Design-Expert 软件求解为得到采收装置最优参组合:抓取高度比 X_1 为 0.55、抓取圆周比 X_2 为 0.76、柔性手指弯曲角 X_3 为 39.7° ,此时采收成功率 Y_1 为 94.9%,菜叶损伤面积为 194 mm^2 。

4 验证试验

为验证 Design-Expert 软件求解得到的最优参

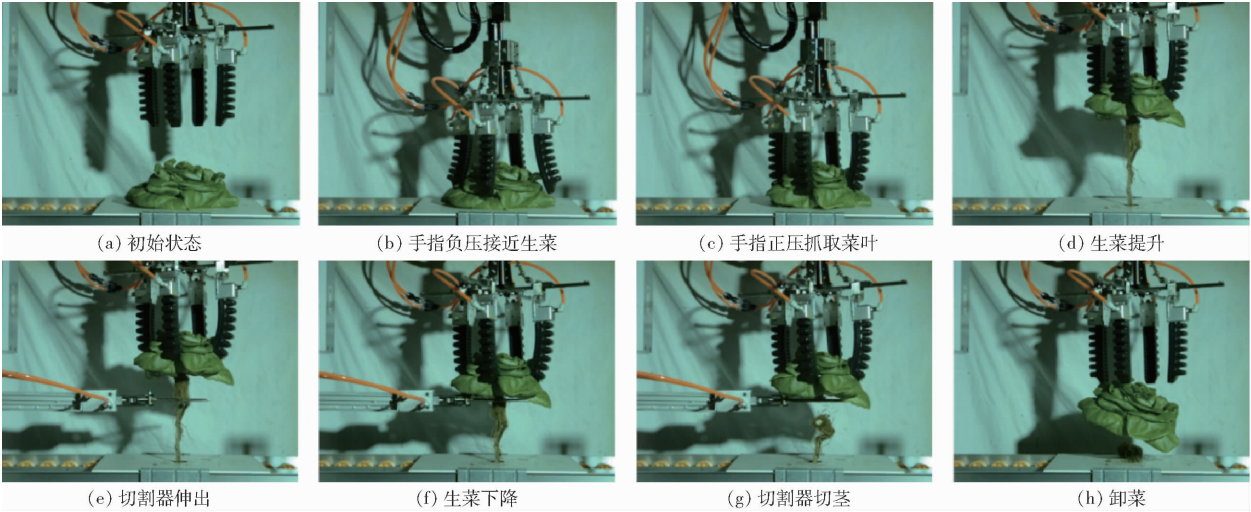


图 19 水培生菜主要采收过程
Fig. 19 Harvesting process of hydroponic lettuce

功率为 96% (与软件求解相差 1.15%),标准差 7%,变异系数 20.14%;菜叶损伤面积为 186 mm^2 (与软件求解相差 4.30%;相较文献[20]中刚性低损采收的菜叶损伤面积 432 mm^2 ,减小 56.94%),标准差 24 mm^2 ,变异系数 23.31%;优化效果明显。

析,将最优参数组合软件求解过程中,采收成功率权值设置为 0.6、菜叶损伤面积权值设置为 0.4,目标函数和边界约束函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.45 \leq X_1 \leq 0.65 \\ 0.65 \leq X_2 \leq 0.85 \\ 22.6^\circ \leq X_3 \leq 48^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

数组组合,开展验证试验。验证采收成功率时,试验重复 100 次;验证菜叶损伤面积时,试验重复 10 次。水培生菜主要采收作业过程如图 19 所示 (Miro LC111 型高速摄影机拍摄,拍摄频率 400 f/s);采收效果如图 20 所示,生菜完整未切散、生菜茎切口平齐、菜叶无明显损伤。

验证试验结果表明,最优参数组合下,采收成

5 结论

- (1)设计了一款水培生菜柔性采收装置并研制了样机,通过柔性手指对菜叶的低损抓取、切割器对生菜茎的一次性切除,完成水培生菜低损采收。
- (2)响应曲面试验表明,各单因素影响采收成



图 20 采收效果

Fig. 20 Harvesting effect

功率的显著性顺序为柔性手指弯曲角、抓取圆周比、抓取高度比,各单因素对菜叶损伤面积的影响均极显著。

(3)采收装置最优参数组合为抓取高度比 0.55、抓取圆周比 0.76、柔性手指弯曲角 39.7°;验证试验表明,最优参数组合下,采收成功率为 96%,菜叶损伤面积为 186 mm²,实现了水培生菜低损柔性采收。

参 考 文 献

[1] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(12):1-18.
LIU Jizhan. Research progress analysis of robotic harvesting technologies in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 1-18. (in Chinese)

[2] 苑进. 选择性收获机器人技术研究进展与分析[J]. 农业机械学报,2020,51(9):1-17.
YUAN Jin. Research progress analysis of robotics selective harvesting technologies[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 50(9): 1-17. (in Chinese)

[3] 肖体琼,何春霞,陈巧敏,等. 基于机械化生产视角的中国蔬菜成本收益分析[J]. 农业机械学报,2015,46(5):75-82.
XIAO Tiqiong, HE Chunxia, CHEN Qiaomin, et al. Cost-benefit analysis of vegetable production based on agricultural mechanized production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 75-82. (in Chinese)

[4] 刘霓红,蒋先平,程俊峰,等. 国外有机设施园艺现状及对中国设施农业可持续发展的启示[J]. 农业工程学报,2018,34(15):1-9.
LIU Nihong, JIANG Xianping, CHENG Junfeng, et al. Current situation of foreign organic greenhouse horticulture and it's inspiration for sustainable development of Chinese protected agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15): 1-9. (in Chinese)

[5] 齐飞,魏晓明,张跃峰,等. 中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向[J]. 农业工程学报,2017,33(24):1-9.
QI Fei, WEI Xiaoming, ZHANG Yuefeng, et al. Development status and future research emphase on greenhouse horticultural equipment and its relative technology in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 1-9. (in Chinese)

[6] 辜松. 设施园艺装备化作业生产现状及发展建议[J]. 农业工程技术(设施园艺),2018,38(4):10-15.

[7] 贺冬仙. 人工光型植物工厂在中国产业化发展的新动向[J]. 中国蔬菜,2018,1(5):1-8.

[8] 王俊,杜冬冬,胡金冰,等. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J]. 农业机械学报,2014,45(2):81-87.
WANG Jun, DU Dongdong, HU Jinbing, et al. Vegetable mechanized harvesting technology and its development[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 81-87. (in Chinese)

[9] 于畅畅,高振铭,徐丽明,等. 植物工厂立体栽培系统多功能作业平台优化与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(1):266-275.
YU Changchang, GAO Zhenming, XU Liming, et al. Optimization and experiment of the multifunctional operation platform of the stereo cultivation system for plant factory[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1): 266-275. (in Chinese)

[10] DU D D, WANG J. Research on mechanics properties of crop stalks: a review[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(6): 10-19.

[11] CHO S I, CHANG S J, KIM Y Y, et al. AE-automation and emerging technologies: development of a three-degrees-of-freedom robot for harvesting lettuce using machine vision and fuzzy logic control[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(2): 143-149.

[12] UCHIDA T, YAMANO T, MIYAZAKI H. Development on automatic harvesting system for leaf vegetables[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1994, 6(3): 197-202.

[13] SIMON B, JOSIE H, JULIA Y C, et al. A field-tested robotic harvesting system for iceberg lettuce[J]. Journal of Field Robotics, 2019, 34(6): 1-21.

- DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang. Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 7190–7201. (in Chinese)
- [31] 汪小钦, 江洪, 傅银贞. 森林叶面积指数遥感研究进展[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(6): 822–828. WANG Xiaolin, JIANG Hong, FU Yinzheng. Research progress in remote sensing of forest leaf area index[J]. *Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition)*, 2009, 37(6): 822–828. (in Chinese)
- [32] 游士兵, 严研. 逐步回归分析法及其应用[J]. *统计与决策*, 2017, 7(14): 31–35. YOU Shibing, YAN Yan. Stepwise regression analysis and its application[J]. *Statistics & Decision*, 2017, 7(14): 31–35. (in Chinese)
- [33] MA X D, FENG J R, GUAN H O, et al. Prediction of chlorophyll content in different light areas of apple tree canopies based on the color characteristics of 3D reconstruction[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 1–16.
- [34] DONG J W, XIAO X M, WAGLE P, et al. Comparison of four EVI-based models for estimating gross primary production of maize and soybean crop-lands and tallgrass prairie under severe drought[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162(3): 154–168.
- [35] MAJASALMI T, RAUTIAINEN M, STENBERG P. Modeled and measured FPAR in a boreal forest: validation and application of a new model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 189–190: 118–124.
-

(上接第 183 页)

- [14] NANG V N, YAMANE S. Development of prototype harvester for head lettuce[J]. *Engineering in Agriculture*, 2015, 8(1): 18–25.
- [15] BROWN D, GLANCEY J L. Theoretical and experimental analysis of a continuous-blade cutting system for leafy vegetables [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 803–813.
- [16] HUGHES J, SCIMECA L, IFRIM I, et al. Achieving robotically peeled lettuce[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 4(3): 4337–4342.
- [17] 高国华, 王天宝, 周增产, 等. 设施蔬菜收获切割影响因素优化试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 15–21. GAO Guohua, WANG Tianbao, ZHOU Zengchan, et al. Optimization experiment of influence factors on greenhouse vegetable harvest cutting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(19): 15–21. (in Chinese)
- [18] 徐赛超, 毛罕平, 刘洋, 等. 植物工厂生菜采收末端执行机构设计与试验[J]. *农机化研究*, 2018, 40(9): 172–176. XU Saichao, MAO Hanping, LIU Yang, et al. Design and test of end effector for lettuce harvest in plant factory[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(9): 172–176. (in Chinese)
- [19] CUI Y J, WANG W Q, WANG M H, et al. Effects of cutter parameters on shearing stress for lettuce harvesting using a specially developed fixture[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(4): 152–158.
- [20] 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)
- [21] 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)
- [22] 贾江鸣, 叶玉泽, 程培林, 等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 26–34. JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and parameter optimization of soft pneumatic gripper for slender fruits and vegetables picking[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 26–34. (in Chinese)
- [23] 刘晓敏, 田德宝, 宋懋征, 等. 气动球果采摘柔性手爪设计与实验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 30–43. LIU Xiaomin, TIAN Debao, SONG Maozheng, et al. Design and experiment on pneumatic flexible gripper for picking globose fruit[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 30–43. (in Chinese)
- [24] 张涛, 李英, 宋树民, 等. 基于柔性夹持的青菜头收获机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊2): 162–169, 190. ZHANG Tao, LI Ying, SONG Shumin, et al. Design and experiment of tumorous stem mustard harvester based on flexible gripping[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Supp. 2): 162–169, 190. (in Chinese)
- [25] 卢伟, 王鹏, 王玲, 等. 褐菇无损采摘柔性手爪设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(11): 28–36. LU Wei, WANG Peng, WANG Ling, et al. Design and experiment of flexible gripper for mushroom non-destructive picking [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11): 28–36. (in Chinese)
- [26] 陈健, 王新忠, 吴又新, 等. 温室生菜根茎的剪切力学特性研究[J]. *农机化研究*, 2020, 42(11): 173–178. CHEN Jian, WANG Xinzong, WU Youxin, et al. Study on shear mechanical properties of greenhouse lettuce roots[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(11): 173–178. (in Chinese)