

# 西兰花选择性采收作业平台识别切割装置设计与试验

宋 昊<sup>1</sup>, 张学敏<sup>1,2\*</sup>, 谢鹏飞<sup>1</sup>, 陈相安<sup>1</sup>, 刘思瑶<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 针对当前人工采收西兰花存在季节性劳动力需求强、劳动强度大以及成本高等问题, 该研究基于西兰花的农艺特性与形态特征设计了一种西兰花选择性采收作业平台, 旨在能够实现对西兰花的自主识别切割作业。首先, 该平台采用“识别-采收”一体化作业模式, 通过对采收作业平台的关键部件进行设计与选型, 建立了西兰花的视觉识别系统和定心切割机构。其次, 根据西兰花茎秆与割刀之间的相互作用关系, 采用对数螺线作为切割曲线设计了一种等滑切角割刀, 确定了割刀滑切角 40°、切割半径 135 mm、割刀长度 260 mm 等关键切割参数。根据西兰花茎秆的材料属性参数, 基于 ANSYS Workbench/LS-DYNA 软件对茎秆切割过程进行显式动力学仿真分析, 以割刀刃角和转速为控制因子, 以最大切割力为试验指标, 利用正交试验优化设计, 确定了茎秆切割过程的最优参数组合为割刀刃角 20°、转速 1 rad/s, 在此参数下最大切割力为 725.82 N, 切割质量较优。最后, 对采收作业平台进行性能试验, 结果表明视觉系统能够有效识别自然环境下的成熟西兰花植株, 检测效果良好; 定心切割机构可快速平稳的切入并切断西兰花茎秆, 切断表面平整光滑; 采收作业平台整体漏收率在 10% 以下、检测准确率为 90%、切茎合格率为 88.9%, 可满足西兰花选择性采收的作业需求。本研究可为西兰花选择性采收作业装备的设计开发提供理论参考和实际借鉴。

**关键词:** 收获; 农业机械; 机器视觉; 西兰花; 切割装置; 显式动力学

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309142

中图分类号: S225

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0068-12

宋昊, 张学敏, 谢鹏飞, 等. 西兰花选择性采收作业平台识别切割装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 68-79. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309142 <http://www.tcsae.org>

SONG Hao, ZHANG Xuemin, XIE Pengfei, et al. Design and experiment of the identification cutting devices for a selective harvesting platform of broccoli[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 68-79. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309142 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

西兰花 (*Brassica oleracea* L. var. *Italica* Plenck) 属十字花科草本植物, 其营养成分丰富, 富含蛋白质、维生素、叶酸和矿物质等, 具有较高的食用价值<sup>[1-2]</sup>。西兰花主根基部粗大, 根系发达, 食用部分主要是脆嫩的花茎和紧密群集成球状的花蕾。然而, 由于西兰花具有错期成熟、茎秆粗壮和采收标准不同等特点, 因此采收时无法采用传统的单次收获方式, 需要通过选择性收获进行分批次采收<sup>[3-4]</sup>。目前, 西兰花选择性收获仍多依赖于人工采收的方式, 通过人眼对西兰花成熟度进行判断和定位, 然后利用末端执行器对花球进行采收, 存在作业效率低、劳动强度大以及成本高等问题, 无法满足现代化西兰花产业的发展需求。

随着机器视觉技术的完善与普及, 机器视觉已被广泛应用于工业生产、食品检测、汽车制造和国防军事等多种领域<sup>[5-6]</sup>。在现代化农业快速发展的背景下, 利用机器视觉技术研制的多种果蔬采收装备也得到了快速稳定

发展<sup>[7-9]</sup>。VAN HENTEN 等<sup>[10-11]</sup> 基于近红外视觉系统设计了一种黄瓜选择性采收机器人, 其末端执行器包含夹持和切割机构, 采摘成功率为 80%, 采摘效率为 54 s/个。DE PRETER 等<sup>[12]</sup> 开发了一种草莓采摘机器人, 其机械臂上装有柔性夹爪, 可以通过在温室中自主导航检测成熟草莓并进行采摘, 采摘效率为 4 s/个。ARAD 等<sup>[13]</sup> 开发了一种甜椒收获机器人, 其前端装有一个六自由度工业臂, 末端装有设计的专用采摘执行器, 通过视觉系统对成熟甜椒进行定位, 采收效率为 24 s/个。赵德安等<sup>[14]</sup> 设计了一种五自由度苹果采摘机器人, 该机器人混合使用电动和气动两种驱动方式, 能够进行全天候工作, 采摘成功率为 81.25%, 采摘效率为 7.81 s/个。徐丽明等<sup>[15]</sup> 基于欠驱动原理设计了一种脐橙采摘机器人末端执行器, 其利用吸附机构、夹持机构和旋切机构可实现脐橙的无损采收, 采摘成功率为 94.28%, 采摘效率为 1.76 s/个。

在西兰花选择性采收装备研发方面, WILHOIT 等<sup>[16]</sup> 搭建了一种手持式西兰花采收作业装置, 该装置配有碎叶环与切割刀, 通过将剥叶与切茎相结合, 采收效率较人工提高 50%, 初步实现了西兰花的选择性采收, 但其需要人工对花球进行识别定位。SHEARER 等<sup>[17]</sup> 基于锯齿机构设计了一种西兰花选择性收获机, 操作人员通过目测调整切断锯的纵向高度并将其移至西兰花茎秆处, 实现了连续与选择性收获西兰花, 采收成功率约为 80%, 但其操作难度较大, 需要人工不断调整切断锯的位置。

收稿日期: 2023-09-18 修订日期: 2023-12-12

基金项目: 科技部创新方法工作专项 (2016IM030200)

作者简介: 宋昊, 博士生, 研究方向为车辆与智能农机装备。

Email: car\_sh@163.com

\*通信作者: 张学敏, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为车辆节能环保与新能源技术。Email: xuemin\_zh@cau.edu.cn

BLOK 等<sup>[18-19]</sup> 基于机器视觉对西兰花选择性收获机进行了研究, 通过设计专用的信息识别系统对花球进行检测和判断, 带有末端执行器的机械臂可以完成对西兰花的采收和运输, 识别和采收成功率均在 90% 以上, 但其主要针对西兰花的识别检测方法进行研究, 并未深入探讨西兰花的收割问题。XU 等<sup>[20]</sup> 设计了一种欠驱动式西兰花采收末端执行器, 该执行器具有较好的自适应性和灵活性, 能够满足西兰花选择性采收的需求, 但其需要人工获取西兰花的位置信息并输入至控制系统。

综上所述, 将机器视觉与农业机械装备领域相结合, 通过搭建高性能的视觉识别系统和设计专用的末端执行器, 是实现西兰花选择性采收的关键途径之一。然而, 现阶段的西兰花选择性采收方案较为落后, 机器视觉技术并未较好的结合到西兰花采收作业装置中。因此, 在满足西兰花采收农艺、采收质量和采收效率的基础上, 研究基于机器视觉的西兰花选择性采收方案, 尽可能提高采收作业装置的自动化、智能化水平, 降低采收成本, 对促进西兰花产业的发展具有重要意义。为此, 本研究基于西兰花的农艺特性与形态特征, 提出“识别-采收”一体化作业模式, 通过对西兰花选择性采收作业平台的关键部件进行设计与选型, 结合理论推导和试验分析验证西兰花采收方案与采收装置的可行性。

1 西兰花农艺特性与形态特征

1.1 西兰花种植与采收农艺

西兰花属低温长日照作物, 种植机械化程度较高, 种植时常采用单垄双行、交错种植模式。不同地区的西兰花种植密度多有不同, 通过查阅资料<sup>[21-22]</sup> 和实地调研, 获取中国北方地区的西兰花种植平均垄宽  $D$  约为 800 mm, 行距  $D_1$  为 400 mm, 垄高  $H$  为 200 mm。

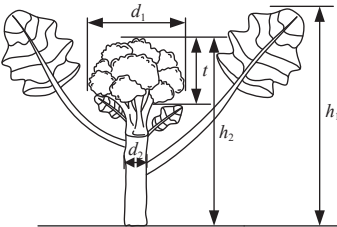
西兰花采收作业时, 除了需要对西兰花花球的成熟度进行判断外, 不同的销售方式也对西兰花具有不同的采收标准。若用于工厂切块冷藏, 则花球直径约为 180~200 mm, 茎秆保留长度约为 50 mm; 若用于零售, 则花球直径约为 140~170 mm, 茎秆保留长度为 60~100 mm<sup>[23]</sup>。本文针对零售途径的西兰花进行采收作业平台的结构设计, 因此西兰花茎秆保留长度约为 80 mm。

1.2 西兰花形态特征

成熟期的西兰花植株主要由花球、茎秆、侧枝和根构成, 其花球被高大的侧枝包围, 花球表面高低不平、花蕾紧实, 四周侧枝脆、易折, 侧叶呈深绿色、椭圆形, 在侧枝侧叶的保护下, 花球可有效减少太阳光直射的影响。为了使研制的西兰花选择性采收作业平台便于田间作业, 于 2022 年 10 月 31 日在北京市平谷区东高村镇西兰花种植区实地测量了“耐寒优秀”品种的成熟西兰花植株外形特征数据。测量方法参照 GB/T 5 262-2008 《农业机械 试验条件测定方法的一般规定》进行, 测量仪器主要为直尺、卷尺和游标卡尺, 测量参数如图 1 所示。

采用五点法在田间随机选取 100 株成熟期的西兰花植株, 通过对花球直径  $d_1$ 、花球厚度  $t$ 、花球下部 80 mm

区域茎秆直径  $d_2$ 、叶片最大离地高度  $h_1$  和花球顶部离垄面高度  $h_2$  进行统计, 获取的西兰花植株形态特征参数如表 1 所示。另外, 为了获取西兰花茎秆的材料属性参数, 利用电子万能试验机 (型号 INSTRON 2 519-104, 最大载荷 500 N, 精度 0.000 01 N) 对西兰花茎秆进行物理特性压缩试验。经多组重复性试验, 获得西兰花茎秆的弹性模量  $E$  为 1 101.468 MPa, 平均密度  $\rho$  为 0.993 g/cm<sup>3</sup>, 泊松比  $\mu$  为 0.326。



注:  $d_1$  为花球直径, mm;  $t$  为花球厚度, mm;  $d_2$  为花球下部 80 mm 区域茎秆直径, mm;  $h_1$  为叶片最大离地高度, mm;  $h_2$  为花球顶部离垄面高度, mm。  
Note:  $d_1$  is the diameter of the flower ball, mm;  $t$  is the thickness of the flower ball, mm;  $d_2$  is the stalk diameter in the 80 mm area below the flower ball, mm;  $h_1$  is the maximum ground clearance of the leaf, mm;  $h_2$  is the height from the top of the flower ball to the ridge surface, mm.

图 1 西兰花植株形态测量参数  
Fig.1 Measurement parameters of broccoli plant morphology

表 1 西兰花植株形态特征参数  
Table 1 Morphological characteristic parameters of broccoli plants

参数 Parameter	范围 Range	均值 Mean value
花球直径 Flower ball diameter $d_1$ /mm	153.5~225.3	182.1
花球厚度 Flower ball thickness $t$ /mm	72.3~123.0	91.2
茎秆直径 Stalk diameter $d_2$ /mm	39.7~46.1	45.1
叶片高度 Leaf height $h_1$ /mm	693.3~824.6	753.4
花球高度 Flower ball height $h_2$ /mm	276.5~332.2	301.3

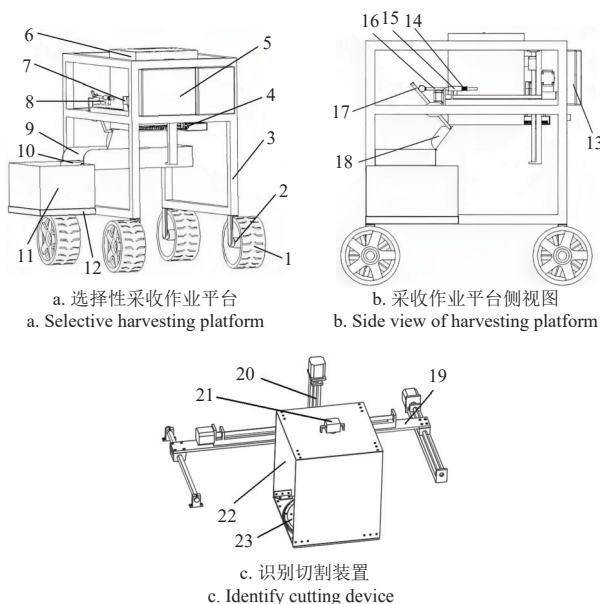
2 整体结构与工作原理

2.1 整体结构

根据西兰花的农艺特性与形态特征, 设计的西兰花选择性采收作业平台主要由行走系统、识别切割装置、触发收集装置和控制系统组成, 整体结构如图 2a、图 2b 所示。行走系统选用四组传动效率高、布置方便的轮毂电机作为驱动车轮, 通过车轮安装轴将其安装在行走车架上, 同时配备两组 48 V 锂电池, 实现整机的行走与转向功能。识别切割装置主要由定位机构、升降机构、视觉系统、采摘头和定心切割机构等组成, 其整体被安装在采收作业平台内部, 其中视觉系统、采摘头和定心切割机构做成一体固定在升降机构上, 升降机构安装在定位机构上, 采摘头四面不透光, 搭配 LED 光源可以构建相对稳定的图像识别环境, 如图 2c 所示。触发收集装置主要由横梁、滑板、摇杆、滑杆、滑套、回位弹簧、收集箱支撑架、收集箱、输送带和输送槽等组成, 收集箱



支撑架和输送槽分别与行走车架焊接为一体, 收集箱安放在收集箱支撑架上, 输送带由螺栓轴承与输送槽连接, 通过输送电机给输送带提供动力, 将释放到输送带上的西兰花运输至收集箱。控制系统主要由上位机和下位机组成, 上位机以 Raspberry Pi 4B 处理器为核心获取西兰花的视觉信息, 下位机以 Arduino Mega2560 处理器为核心控制整机行走、西兰花定位、茎秆切割和花球抓取等作业功能。通过视觉系统对西兰花进行图像采集、识别、判断及定位, 控制系统可引导定位与升降机构完成对西兰花花球的精准采收。西兰花选择性采收作业平台的主要技术参数如表 2 所示。



1. 驱动车轮 2. 车轮安装轴 3. 车架 4. 双目相机 5. 锂电池 6. 识别切割装置 7. 横梁 8. 触发机构 9. 输送槽 10. 输送带 11. 收集箱 12. 收集箱支撑架 13. 控制系统 14. 回位弹簧 15. 滑套 16. 滑杆 17. 摇杆 18. 滑板 19. 定位机构 20. 升降机构 21. 视觉系统 22. 采摘头 23. 定心切割机构

图 2 西兰花选择性采收作业平台结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the structure of the selective harvesting platform for broccoli

表 2 西兰花选择性采收作业平台主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of the selective harvesting platform for broccoli

技术参数 Technical parameter	数值 Values
整机尺寸 (长×宽×高) Overall dimension (Length × Width × Height)/mm	1 100×900×1 200
采摘头尺寸 (长×宽×高) Picking head dimension (Length × Width × Height)/mm	342×342×400
定心切割机构初始离地高度 Initial ground clearance of the centering cutting mechanism/mm	800
供电电压 Supply voltage/V	48
车轮轮距 Wheel track width/mm	1 300
轮毂电机额定功率 Rated power of hub motor/W	450
最大爬坡角度 Maximum climbing angle/(°)	15
最小转弯半径 Minimum turning radius/mm	0
作业速度 Working speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	0~500

## 2.2 工作原理

为实现西兰花选择性采收作业平台的自主识别切割作业, 通过搭建视觉识别系统和定心切割机构进行采收, 采收方式设计为“识别-采收”一体化作业模式, 工作原理如图 3 所示。在该作业模式下, 西兰花采用单株双排收获作业的方式, 视觉系统、采摘头和定心切割机构共同移动作业, 避免执行机构单独运动对识别过程产生干扰, 并便于计算执行机构的具体移动距离, 提高作业精度。由于西兰花为单垄双行交错种植模式, 因此采收时通过将整机中心线与定位机构的相交点设置为基准点, 采收时先将采摘头从基准点移动到行一侧进行对行。视觉系统对下方的西兰花植株进行图像采集和处理, 系统内部判断西兰花是否满足采收要求, 若满足要求则对花球位置进行定位, 定心切割机构完成对西兰花的茎秆切割和花球抓取。采摘完毕后采摘头到达收集位置释放花球, 然后采摘头回到坐标基准点 (若未采摘则直接回到坐标基准点), 最后采摘头从基准点移动到另一侧进行对行, 以此往复, 直至收获完该垄的西兰花植株。

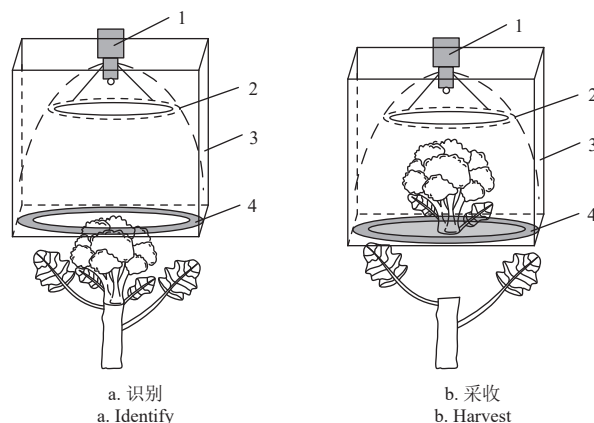


图 3 识别切割装置工作原理示意图

Fig.3 Working principle diagram of identify cutting devices

西兰花选择性采收作业平台的采收作业流程和控制系統结构示意图分别如图 4、图 5 所示。采收作业时, 通过遥控控制西兰花选择性采收作业平台驶入西兰花种植行间, 遥控手柄通过 2.4 GHz 射频通信方式与接收器进行连接, 接收器通过 SPI (Serial Peripheral Interface) 通信协议与 Arduino 进行通信, 然后切换为自主作业模式。采收作业平台以额定速度在西兰花植株行间运行, 视觉系统通过 USB 2.0 接口与 Raspberry Pi 进行通信采集下方的西兰花植株图像, 当行驶至西兰花植株上方后, 采收作业平台整机停车, 视觉系统内部处理并识别花球信息, 判断是否满足采收要求, 若满足要求则对花球位置进行定位, 反之则继续采集图像。Raspberry Pi 通过 USB 2.0 接口与 Arduino 进行串口通信, 然后 Arduino 通过 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 通信协议与 RS232 接口通信以控制电机和舵机。由于相机的几何中心和定心切割机构的中心同轴, 因此基于视觉系统所获取的花球中心位置信息, 控制系统引导定位机构将采摘头移动至西兰花花球正上方, 然后控制升降机构将定心切割机构移动至作业所需高度, 到达作业位

置后切割机构切断茎秆并抓取花球。之后，依次控制升降与定位机构将花球向着输送槽方向移动，当左右滑杆在滑套内移动到指定位置时，位置传感器将信号发送给控制系统，此时在触发机构的作用下，滑板与采摘头相连接，保证西兰花花球的无损释放，释放后定位与升降机构复位，完成该花球的采收任务。当视觉和控制系统判断前方无西兰花植株图像后，采收任务结束，否则采收作业平台继续前进，循环上述采收作业流程。

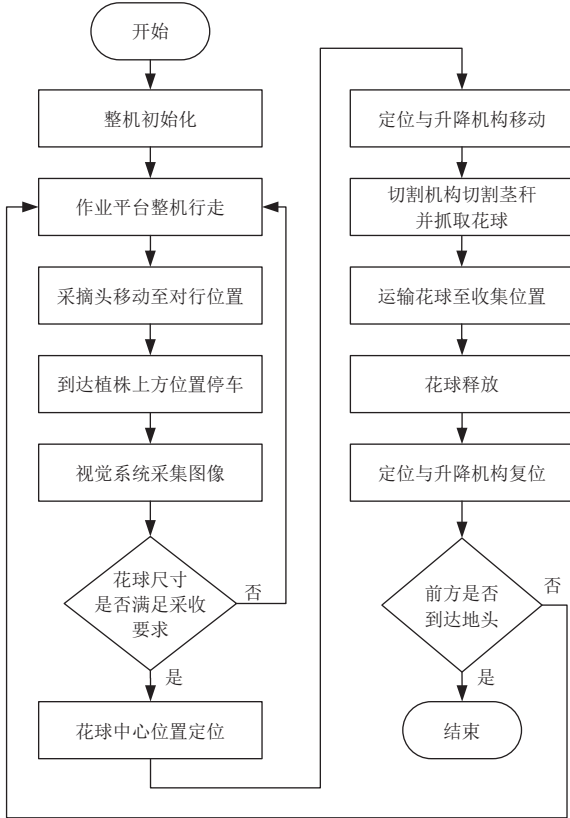


图 4 采收作业流程

Fig.4 Harvesting operation process

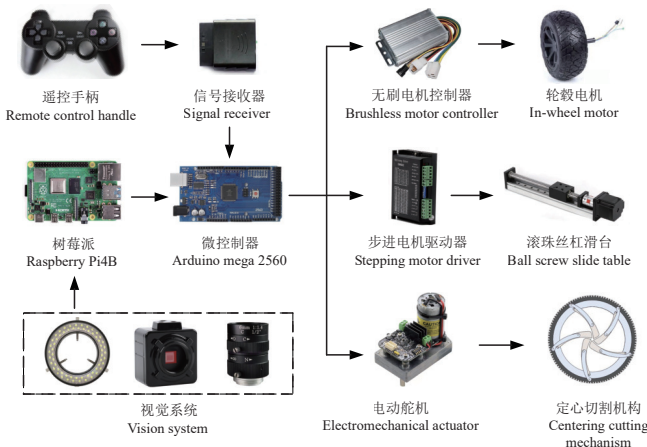


图 5 控制系统结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of control system structure

### 3 关键部件设计与选型

#### 3.1 视觉系统

为保证采收作业平台作业时的识别效果与识别精度，

降低外界光照条件对图像处理的影响，设计一套由遮光、照明和成像等关键部件组成的视觉系统(图 6)。在照明方案的选择上，由于当前机器视觉并没有普适的照明方案，因此需要针对具体的应用场景并考虑待检测目标与背景的色差、距离等因素进行选择。通过对比卤素灯、LED 灯、荧光灯和红外等多种光源<sup>[24-25]</sup>，考虑西兰花的采收场景以及色彩图像需求，选取白光 LED 灯作为照明光源，如图 6a 所示。另外，考虑到视觉系统的布置方案，后续应避免作业过程中光源触碰西兰花花球，因此选择明场照明方式。

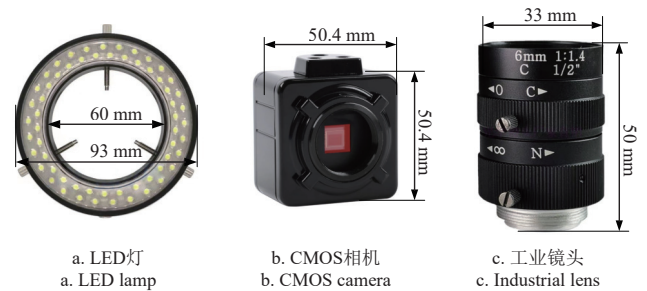


图 6 视觉系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of visual system

成像部件主要通过工业相机、镜头等设备实现对被检测目标图像的采集，从而将获取的图像传送到图像处理系统进行检测。工业相机按数据传送方式的不同可分为 CCD 相机和 CMOS 相机两类<sup>[26-27]</sup>。考虑到 CMOS 相机能耗低，数据读取快，适用于整机连续作业且能够保证作业效率，因此本设计选取如图 6b 所示的 CMOS 相机。另外，考虑到镜头参数会直接影响到获取图像的清晰度和畸变程度，且该环节造成的图像信息缺失难以修复，因此通过对比多种工业相机镜头，结合西兰花的采收场景选择定焦工业镜头，如图 6c 所示。

控制系统中的上位机对西兰花图像进行采集和处理，视觉系统采集西兰花原始图像(图 7a)；为降低图像噪声干扰，经灰度化、高斯滤波和阈值分割等预处理后得到二值化图像(图 7b)；对二值化图像进行二次均值滤波处理，经开运算和闭运算后以平滑西兰花轮廓(图 7c)；基于像素面积对西兰花花球进行检测，并根据像素标定结果和矩方法计算出花球的大小尺寸和质心位置(图 7d)；上述图像处理时间为 2.5 s，轮廓平均偏差度为 2.2%，测量质心位置误差为 4.2 %。

#### 3.2 定心切割机构

定心切割机构的作用是在适当的位置将成熟期的西兰花茎秆切断，并抓取花球至收集位置释放。定心切割机构是西兰花选择性采收作业平台的核心部件，设计时应保证其有足够的切割效果与切割速度，并能在避免损伤花球的同时抓起花球。基于以上需求，设计的定心切割机构如图 8 所示，其主要由电动舵机、齿轮副、齿圈、机架、驱动臂和割刀等组成。其中，电动舵机通过齿轮副与齿圈相连，驱动臂一端固定在齿圈上，另一端通过螺栓和衬套与割刀连接，割刀固定在机架上。齿圈与机



架、驱动臂与齿圈、驱动臂与割刀、割刀与机架铰接点之间均有转动副，舵机通过转动一定的角度控制割刀进行往复运动，进而完成进刀与退刀动作。

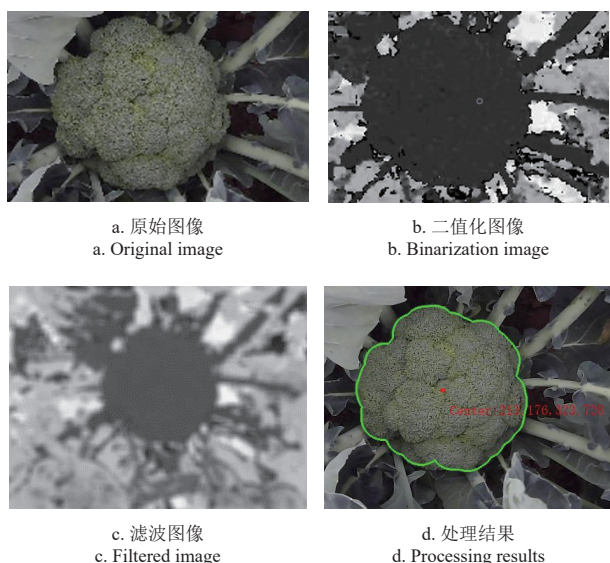
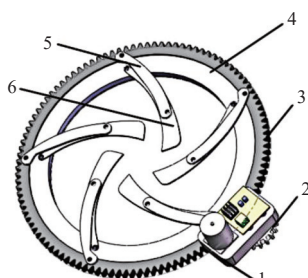


图 7 视觉系统图像处理过程  
Fig.7 Visual system image processing process



1. 电动舵机 2. 齿轮副 3. 齿圈 4. 机架 5. 驱动臂 6. 割刀  
1. Electromechanical actuator 2. Gear pair 3. Gear ring 4. Rack 5. Drive arm 6. Cutting knife

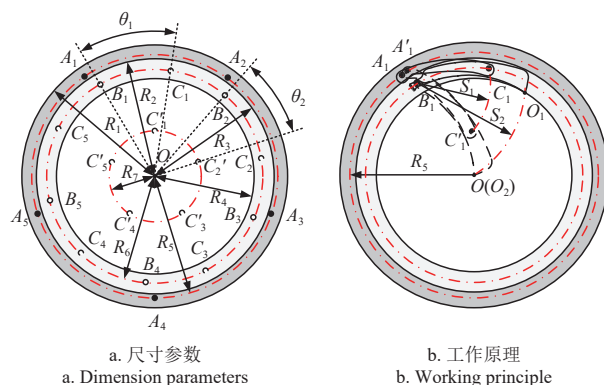
图 8 定心切割机构示意图

Fig.8 Schematic diagram of the centering cutting mechanism

在定心切割机构的结构设计中，驱动臂和割刀以 5 组四杆机构组成的圆周阵列为布置形式，每组四杆机构共用一组齿圈和机架。各部件间安装过程中为确保使用衬套连接时不存在间隙，在安装时适当增加预压力以确保连接紧密，并添加润滑剂以减少摩擦。以西兰花的采收农艺和形态特征为设计约束，各部件的尺寸参数如图 9a 所示。其中， $R_1=168\text{ mm}$ 、 $R_2=151\text{ mm}$ 、 $R_3=150\text{ mm}$ 、 $R_4=125\text{ mm}$ ；齿圈模数为 3； $A_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) 均布在半径为  $R_5=155\text{ mm}$  的圆上； $B_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) 均布在半径为  $R_6=135\text{ mm}$  的圆上；初始状态  $C_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) 均布在半径为  $R_6=135\text{ mm}$  的圆上，闭合状态  $C'_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) 均布在半径为  $R_7=55\text{ mm}$  的圆上；运动前后点  $B_nC_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) 间的夹角  $\theta_1=38^\circ$  变换为点  $B_nC'_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) 间的夹角  $\theta_2=28^\circ$ 。

以一组割刀机构为例，西兰花定心切割机构的工作原理如图 9b 所示。其中，割刀实线位置  $A_1B_1O_1C_1$  为切割机构初始状态，虚线位置  $A'_1B_1O_2C'_1$  为切割机构闭合

状态。当齿圈顺时针转动时，驱动臂与齿圈间的铰接点  $A_1$  会沿着  $R_5$  所在的圆顺时针向点  $A'_1$  移动，此时会带动驱动臂与割刀间的铰接点  $C_1$  沿着弧  $S_1$  向点  $C'_1$  移动，割刀刀尖  $O_1$  沿着弧  $S_2$  向点  $O_2$  移动。当割刀刀尖  $O_1$  与点  $O$  完全重合时，整个割刀实现闭合，此时即完成对西兰花茎秆的切割作业。将 5 组割刀依次固定在平面内同步运动，不作业时 5 组割刀靠近齿圈，从而避免干扰图像采集和西兰花花球通过；作业时 5 组割刀同时伸出，将西兰花茎秆切断，并保证花球不下落。定心切割机构的工作过程如图 10 所示。



注： $R_1$  为齿圈外圈半径，mm； $R_2$  为齿圈内圈半径，mm； $R_3$  为机架外圈半径，mm； $R_4$  为机架内圈半径，mm； $R_5$  为驱动臂与齿圈间的铰接点所在圆半径，mm； $R_6$  为割刀与机架间的铰接点所在圆半径，mm； $R_7$  为闭合状态时驱动臂与割刀间的铰接点所在圆半径，mm； $A_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) 为驱动臂与齿圈间的铰接点； $B_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) 为割刀与机架间的铰接点； $C_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) 为初始状态时驱动臂与割刀间的铰接点； $C'_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) 为闭合状态时驱动臂与割刀间的铰接点； $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为运动前后点  $B_nC_n$  间的夹角，( $^\circ$ )； $O$  为定心切割机构中心位置； $O_1$ 、 $O_2$  为割刀刀尖位置； $A'_1$  为闭合状态时驱动臂与齿圈间的铰接点位置； $S_1$  为切割时驱动臂与割刀间铰接点的运动轨迹； $S_2$  为切割时割刀刀尖的运动轨迹。

Note:  $R_1$  is the radius of the outer gear ring, mm;  $R_2$  is the radius of the inner gear ring, mm;  $R_3$  is the outer radius of the rack, mm;  $R_4$  is the inner radius of the rack, mm;  $R_5$  is the radius of the circle where the hinge point between the drive arm and the gear ring is located, mm;  $R_6$  is the radius of the circle where the hinge point between the cutting knife and the rack is located, mm;  $R_7$  is the radius of the circle where the hinge point between the drive arm and the cutting knife is located in a closed state, mm;  $A_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) is the hinge point between the drive arm and the gear ring;  $B_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) is the hinge point between the cutting knife and the rack;  $C_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) is the hinge point between the drive arm and the cutting knife in the initial state;  $C'_n$  ( $n=1,2,\dots,5$ ) is the hinge point between the drive arm and the cutting knife when in a closed state;  $\theta_1$  and  $\theta_2$  are the angle between the points  $B_nC_n$  before and after the motion, ( $^\circ$ );  $O$  is the center position of the centering cutting mechanism;  $O_1$  and  $O_2$  are the positions of the cutting knife tip;  $A'_1$  is the hinge point position between the drive arm and the gear ring in the closed state;  $S_1$  is the motion trajectory of the hinge point between the driving arm and the cutting knife during cutting;  $S_2$  is the motion trajectory of the cutting knife tip during cutting.

图 9 定心切割机构尺寸参数与工作原理

Fig.9 Dimensional parameters and working principle of centering cutting mechanism

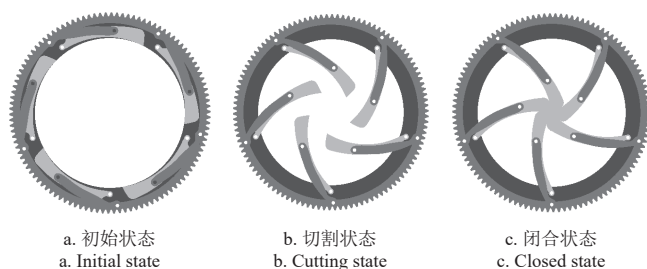


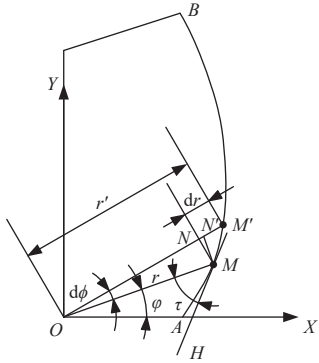
图 10 定心切割机构工作过程

Fig.10 Working process of centering cutting mechanism

### 3.3 割刀切割参数

割刀的切割方式主要由刀具进入材料的方向所决定,按照切割方向的不同可将其分为砍切和滑切两种。由于等滑切角(对数螺线)割刀滑切阻力小、切割性能好,因此本文以对数螺线作为切割曲线设计一种等滑切角割刀,以降低切割功耗,提高切割效率<sup>[28-30]</sup>。

等滑切角曲线如图11所示,假设曲线上有任意切割点 $M$ ,过点 $M$ 与曲线相切的直线为 $MH$ , $OM$ 与坐标轴 $X$ 的夹角为 $\varphi$ ,则无论点 $M$ 在曲线上何处, $OM$ 与 $MH$ 组成的夹角 $\tau$ 为定值。



注:  $r$  为极径, mm;  $r'$  为转动角度后的极径, mm;  $dr$  为极径增量, mm;  $\varphi$  为极角, ( $^\circ$ );  $d\varphi$  为转动角度, ( $^\circ$ );  $\tau$  为滑切角, ( $^\circ$ );  $AB$  为割刀刃口线;  $M$  为初始切割点;  $M'$  为转动角度后的切割点;  $N$  为  $dr$  在  $r'$  上的交点;  $N'$  为  $r$  在  $r'$  上的交点;  $OX$ 、 $OY$  为坐标轴。

Note:  $r$  is the polar diameter, mm;  $r'$  is the polar diameter after rotation angle, mm;  $dr$  is the increment of polar diameter, mm;  $\varphi$  is the polar angle, ( $^\circ$ );  $d\varphi$  is the rotation angle, ( $^\circ$ );  $\tau$  is the sliding cutting angle, ( $^\circ$ );  $AB$  is the cutting edge line;  $M$  is the initial cutting point;  $M'$  is the cutting point after the rotation angle;  $N$  is the intersection of  $dr$  on  $r'$ ;  $N'$  is the intersection of  $r$  on  $r'$ ;  $OX$  and  $OY$  are the coordinate axes.

图11 等滑切角曲线示意图

Fig.11 Schematic diagram of constant slip tangent curve

当割刀刃口线 $AB$ 由任意 $\varphi$ 角转动 $d\varphi$ 角时,其切割点由点 $M$ 变为 $M'$ ,极径由 $r$ 变为 $r'$ ,增加 $dr$ 。若转动角度 $d\varphi$ 很小趋近于0时,则弧 $MM'$ 可看作直线,弧度 $MN'$ 与直线 $MN$ 相等。根据滑切角定义,在 $\triangle MM'N$ 中,滑切角 $\tau$ 与极角 $\varphi$ 的关系可表示为

$$\tan \tau = \frac{MN}{NM'} = \frac{rd\varphi}{dr} \quad (1)$$

若曲线上滑切角 $\tau$ 为给定常数,则对数螺线的极坐标方程为

$$r = ce^{\frac{1}{\tan \tau} \varphi} \quad (2)$$

式中 $c$ 为常数,其表示对数螺线与 $X$ 轴的交点。

当 $\varphi=\pi/2$ 时, $r$ 取得最大值,可得

$$c = \frac{R_c}{e^{\frac{\pi}{2 \tan \tau}}} \quad (3)$$

式中 $R_c$ 为割刀的最大回转半径, mm。

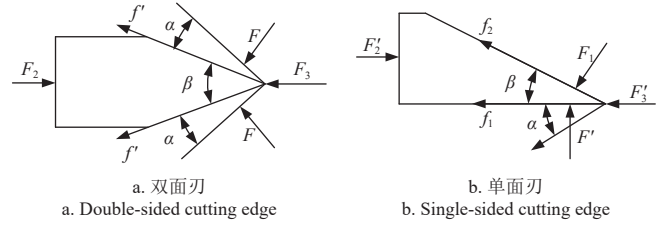
由此可得,等滑切角割刀的刃口曲线方程为

$$r = R_c e^{\frac{2\varphi - \pi}{2 \tan \tau}} \quad (4)$$

该方程的几何特性是指经过极点 $O$ 的各条射线与曲线交点的切线夹角均相等,即均等于割刀刃口线的给定滑切角。依据相关文献可知<sup>[31-32]</sup>,在一定滑切角范围内,滑切程度越大,所需的切割力就越小。通常,滑切角 $\tau$

的取值范围为 $20^\circ \sim 55^\circ$ 。考虑到设计的定心切割机构为圆盘形,为增加有效切割弧长,降低切割阻力和功率消耗,本文设计的割刀滑切角取值为 $40^\circ$ ,切割半径为135 mm,割刀长度为260 mm,宽度为40 mm,厚度为3 mm。

在割刀刃口角设计方面,割刀刃口形状一般有双面刃和单面刃。假设西兰花茎秆质地均匀,且两种刃口形状的割刀材质和质量相同,分别对双面刃和单面刃刃口进行受力分析,以确定合适的割刀刃口形状。两种割刀刃口切割西兰花茎秆时的受力分析如图12所示。



注:  $F$  为茎秆对双面刃楔面的压力, N;  $F_1$  为茎秆对单面刃楔面的压力, N;  $F_2$  为双面刃割刀所需的切割力, N;  $F_3$  为茎秆对双面刃割刀刃口的阻力, N;  $F'$  为茎秆对单面刃割刀底部的正压力, N;  $F_2'$  为单面刃割刀所需的切割力, N;  $F_3'$  为茎秆对单面刃割刀刃口的阻力, N;  $f'$  为双面刃楔面所受茎秆的摩擦力, N;  $f_1$  为单面刃割刀底部所受茎秆的摩擦力, N;  $f_2$  为单面刃割刀楔面所受茎秆的摩擦力, N;  $\alpha$  为割刀切割时的摩擦角, ( $^\circ$ );  $\beta$  为割刀刃口角, ( $^\circ$ )。

Note:  $F$  is the pressure of the stalk on the double-sided cutting edge wedge surface, N;  $F_1$  is the pressure of the stalk on the single-sided cutting edge wedge surface, N;  $F_2$  is the required cutting force for the double-sided cutting edge cutting knife, N;  $F_3$  is the resistance of the stalk to the double-sided cutting edge, N;  $F'$  is the positive pressure of the stalk on the bottom of the single-sided cutting edge cutting knife, N;  $F_2'$  is the required cutting force for the single-sided cutting edge cutting knife, N;  $F_3'$  is the resistance of the stalk to the Single-sided cutting edge, N;  $f'$  is the frictional force of the stalk on the Double-sided cutting edge wedge surface, N;  $f_1$  is the frictional force of the stalk on the bottom of the single-sided cutting edge cutting knife, N;  $f_2$  is the frictional force of the stalk on the wedge surface of the single-sided cutting edge cutting knife, N;  $\alpha$  is the friction angle of the cutting knife during cutting, ( $^\circ$ );  $\beta$  is the cutting knife edge angle, ( $^\circ$ ).

图12 割刀刃口受力分析

Fig.12 Force analysis of cutting knife edge

根据如图12a所示的双面刀刃口与西兰花茎秆间的受力关系,摩擦力 $f'$ 为

$$f' = F \tan \alpha \quad (5)$$

双面刃割刀所需的切割力 $F_2$ 为

$$F_2 = F_3 + 2F \left( \tan \frac{\beta}{2} + \tan \alpha \right) \cos \frac{\beta}{2} + ma \quad (6)$$

式中 $m$ 为茎秆切割质点处的质量, kg;  $a$ 为切割质点沿切割方向的加速度,  $m/s^2$ 。

根据如图12b所示的单面刀刃口与西兰花茎秆间的受力关系,由假设条件可知:

$$\begin{cases} F_1 = F \\ F_3' = F_3 \end{cases} \quad (7)$$

由于摩擦角大小保持不变,因此构建摩擦力 $f_1$ 、 $f_2$ 为

$$\begin{cases} f_1 = F' \tan \alpha \\ f_2 = F_1 \tan \alpha \end{cases} \quad (8)$$

单面刃割刀所需的切割力 $F_2'$ 为

$$F_2' = F_3' + f_1 + f_2 \cos \beta + F_1 \sin \beta + ma \quad (9)$$

根据受力分析图可知:

$$F' = F_1 \cos \beta - f_2 \sin \beta \quad (10)$$

结合式 (9) 和式 (10) 可得

$$F'_2 = F_3 + 2F \cos \beta \tan \alpha - F \sin \beta \tan^2 \alpha + F \sin \beta \quad (11)$$

结合式 (6) 和式 (11) 可得

$$\Delta F_2 = F_2 - F'_2 = \frac{2F \sin\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right) [\cos \varphi - \cos\left(\frac{\beta}{2} - \alpha\right)]}{\cos^2 \alpha} \quad (12)$$

根据割刀的设计要求, 可确定  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$  且  $0 \leq \beta \leq \pi/2$ , 因此由式 (12) 可得  $\Delta F_2$  恒大于等于零, 即  $F_2 \geq F'_2$ , 其代表切割相同茎秆时双面刃割刀需要更大的切割力。因此本设计选择单面刃作为割刀刃口形状, 初选割刀刃角为  $30^\circ$ 。另外, 在割刀材料选择上, 考虑到 304 不锈钢具有良好机械性能、耐腐蚀性能和加工性能, 能够确保割刀在潮湿、腐蚀环境下具有足够的强度、刚度和使用寿命, 且便于加工, 因此选用 304 不锈钢作为割刀材料。

### 3.4 定心切割机构切割参数优化

为获取定心切割机构切割西兰花茎秆过程中合适的参数组合, 依据有限元分析理论, 结合 SOLIDWORKS 和 ANSYS Workbench/LS-DYNA 软件建立西兰花茎秆的切割动力学仿真模型。考虑实际作业工况, 通过设定多组割刀刃角与转速组合试验, 以确定最优切割参数组合。

根据割刀的设计要求, 可确定  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$  且  $0 \leq \beta \leq \pi/2$ , 因此由式 (12) 可得  $\Delta F_2$  恒大于等于零, 即  $F_2 \geq F'_2$ , 其代表切割相同茎秆时双面刃割刀需要更大的切割力。因此本设计选择单面刃作为割刀刃口形状, 初选割刀刃角为  $30^\circ$ 。另外, 在割刀材料选择上, 考虑到 304 不锈钢具有良好机械性能、耐腐蚀性能和加工性能, 能够确保割刀在潮湿、腐蚀环境下具有足够的强度、刚度和使用寿命, 且便于加工, 因此选用 304 不锈钢作为割刀材料。

西兰花茎秆模型选用线弹性正交各向异性材料模型, 该模型主要包含密度  $\rho$  和 9 个独立弹性常数  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$ 、

$\mu_{xy}$ 、 $\mu_{yz}$ 、 $\mu_{zx}$ 、 $G_{xy}$ 、 $G_{yz}$ 、 $G_{zx}$ 。由复合材料理论可得, 正交各向异性材料的弹性模量与泊松比的关系为

$$\frac{\mu_{ij}}{E_j} = \frac{\mu_{ji}}{E_i} \quad (i, j = x, y, z; i \neq j) \quad (13)$$

式中  $E_j$ 、 $E_i$  为弹性模量, MPa;  $\mu_{ij}$ 、 $\mu_{ji}$  为泊松比。

同时, 将西兰花茎秆看做横观各向同性材料, 基于此, 其独立的弹性系数可简化为 5 个, 弹性系数满足以下条件:

$$\begin{cases} E_y = E_z \\ \mu_{xy} = \mu_{zx} \\ G_{yz} = E_y/2(1 + \mu_{yz}) \end{cases} \quad (14)$$

式中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为三个主轴;  $E_y$ 、 $E_z$  为弹性模量, MPa;  $\mu_{xy}$ 、 $\mu_{yz}$ 、 $\mu_{zx}$  为泊松比;  $G_{yz}$  为剪切模量, MPa。

根据前文西兰花茎秆压缩试验数据并结合式 (13) 和式 (14), 可获得西兰花茎秆的材料属性参数, 其密度为  $0.993 \text{ g/cm}^3$ ,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的弹性模量  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$  分别为 5 505.70、1 101.47、1 101.47 MPa,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的泊松比  $\mu_{xy}$ 、 $\mu_{yz}$ 、 $\mu_{zx}$  分别为 0.33、0.03、0.33,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的剪切模量  $G_{yz}$ 、 $G_{yz}$ 、 $G_{yz}$  分别为 2 069.81、534.69、414.09 MPa。

分别对割刀模型和西兰花茎秆模型进行网格划分, 划分单元尺寸设置为 5 mm, 划分单元数为 137 973。在 LS-DYNA 中将割刀与西兰花茎秆的接触关系定义为 ERODING-SURFACE-TO-SURFACE, 即面面侵蚀接触。其中割刀定义为主接触体 (MSID), 茎秆为从接触体 (SSID), 静摩擦系数设定为 0.14, 动摩擦系数设定为 0.26。西兰花茎秆一端设置全约束, 另一端无约束, 割刀刀柄处设置节点集, 约束除绕  $X$  轴转动外的全部自由度, 转速设置为 2 rad/s。所有条件定义后, 设定 HOUGLASS 防止沙漏, 随后设定输出, 利用 LS-DYNA SOLVER 进行求解获得的西兰花茎秆切割过程中不同切割时刻  $t$  的等效应力如图 13 所示。

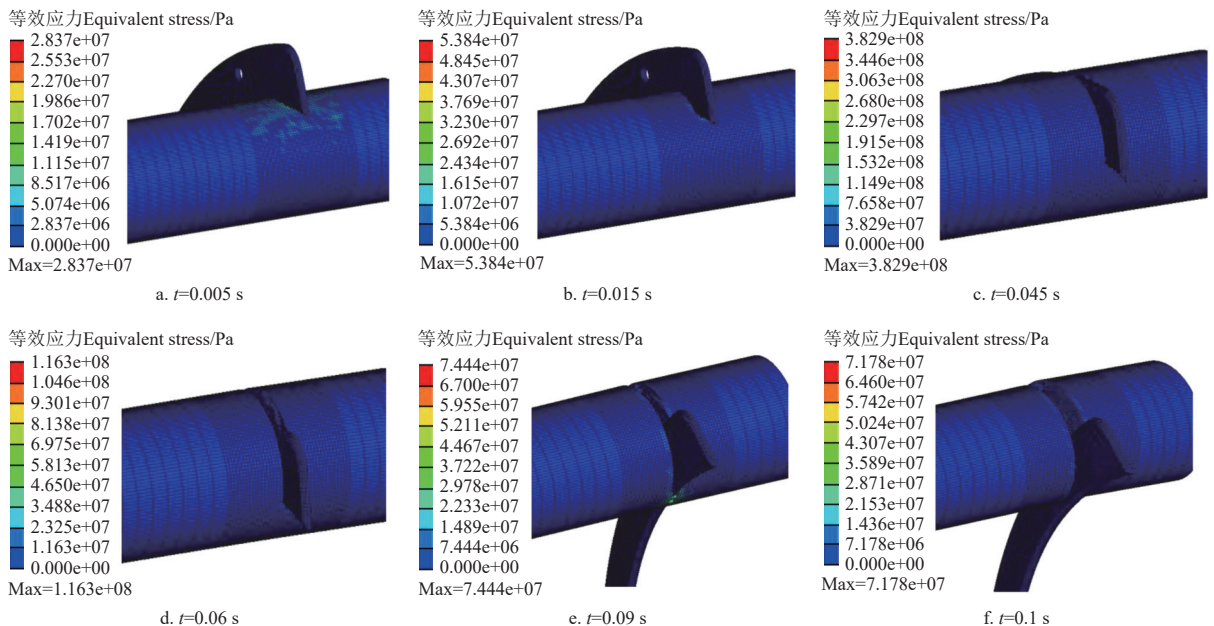


图 13 不同切割时刻  $t$  的等效应力

Fig. 13 Equivalent stress at different cutting moments  $t$



由仿真过程可知，西兰花茎秆切割过程大体可以分为 5 个阶段，第一阶段为挤压阶段（图 13a），该阶段割刀刀刃开始接触西兰花茎秆并进行挤压，茎秆发生弹性变形；第二阶段为切入切割阶段（图 13b），该阶段割刀切入茎秆中，受割刀本身的厚度影响，茎秆从被切入处逐渐切开，所受等效应力与等效应变逐步增大；第三阶段为稳定切割阶段（图 13c、图 13d），该阶段割刀已完全切入茎秆，茎秆掉落一端开始摆动，变形增强，但所受等效应力趋于平稳，茎秆即将切断；第四阶段为切断阶段（图 13e），该阶段茎秆被完全切断，掉落一端不再与割刀接触；第五阶段为割刀穿过阶段（图 13f），该阶段割刀本身并未完全穿过茎秆截面，茎秆固定一端仍与割刀发生接触。西兰花茎秆切割过程的切割力曲线如图 14 所示，其中挤压阶段切割力不断增大；剪切阶段切割力先增加后减少且伴有切割力的突升突降，切割力在 0.043 s 达到峰值 1 030.78 N；切断阶段切割力迅速下降，在茎秆完全断裂处割刀不再与茎秆掉落一端发生作用，切割力达到此阶段最低点，但并未为 0；割刀穿过阶段茎秆已经断裂，但割刀还未完全穿过茎秆截面，茎秆固定一端仍与割刀接触，茎秆掉落瞬间由于冲击的影响，引起固定端茎秆的振动，因此切割力在达到上一阶段最低点后小幅度波动直至为 0。

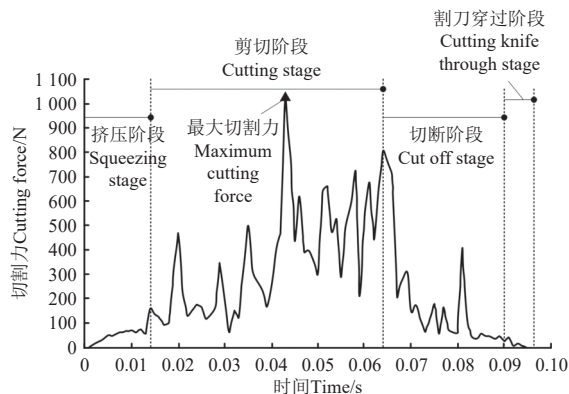


图 14 茎秆切割过程的切割力曲线  
Fig.14 Cutting force curve of stalk cutting process

为进一步探究割刀刃角及转速对茎秆切割过程的受力影响，选取割刀刃角和转速为控制因子，以茎秆所受最大切割力为试验指标进行切割参数优化设计，茎秆在切断过程中受到的最大切割力越小，说明割刀在该参数组合下更容易将西兰花茎秆切断，切割能耗也越低。分别设置割刀刃角 20°、25°、30°和转速 1、2 rad/s 的正交试验设计，每次试验按照给定的因子水平设置模型并进行仿真。各组的试验方案与试验结果如表 3 所示，由结果可知，茎秆所受最大切割力与割刀刃角、转速呈正相关关系。因此选择割刀刃角 20°、转速 1 rad/s 为最优切割参数组合，理论最大切割力为 725.82 N。通过对比多种电动舵机型号，本研究选用 ASME-04B 电动舵机作为割刀驱动装置，其产生扭矩可达 37.25 N·m，经舵机齿轮和齿圈传动后可产生 2 759.3 N 的力，满足使用需求。

表 3 试验方案与结果

Table 3 Experimental program and results			
试验号 Number	割刀刃角 Cutting edge angle/°	转速 Rotation speed/rad·s <sup>-1</sup>	最大切割力 Maximum cutting force/N
1	1	1	725.82
2	1	2	733.26
3	2	1	897.35
4	2	2	906.72
5	3	1	995.59
6	3	2	1 030.78

4 采收作业平台样机试验及分析

4.1 定心切割机构切割性能试验

为了验证仿真结果的有效性与准确性，保证定心切割机构可在现有驱动装置下将西兰花茎秆快速平稳切断，根据设计要求加工并安装了定心切割机构的各个部件。通过对新鲜西兰花茎秆目标区域进行台架切割试验，以验证定心切割机构的作业性能。

台架试验在江苏省盐城市亭湖区新明悦机械制造有限公司进行，通过选取 20 株符合前文统计数据的成熟西兰花植株作为试验对象，保留茎秆 60 ~100 mm 处为切割区域，植株为刚采摘状态，新鲜程度满足采收要求。将西兰花放置在定心切割机构中央位置模拟实际采收状态，此时割刀将要切割的茎秆区域为实际采收标准区域。通过连接 ASME-04B 电动舵机给齿圈一个固定转速，五组割刀同步运动将西兰花茎秆切断，切割过程如图 15 所示。经过 20 次试验验证表明，定心切割机构可快速平稳的切入并切断西兰花茎秆，切断表面平整光滑，驱动装置动力充足，未出现茎秆粘连现象，切割时间约为 0.6 s/个，切割成功率为 100%，能够达到预期的作业效果，并保证一定的切割质量、切割效率与作业可靠性。

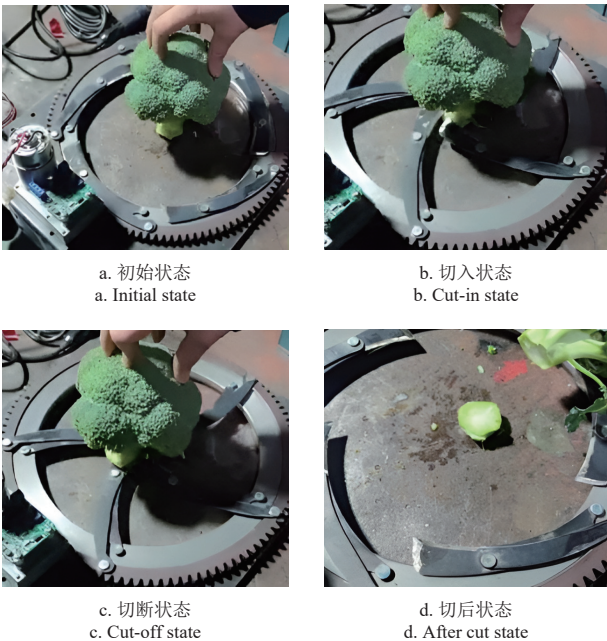


图 15 西兰花茎秆切割过程  
Fig.15 Broccoli stalk cutting process

4.2 采收平台作业性能试验

将研制的西兰花识别切割装置安装在西兰花选择性



采收作业平台内部空间中,参考 JB/T 6 276-2007 《甜菜收获机械 试验方法》,结合西兰花采收的实际状况,对采收平台的作业性能进行验证。采收平台作业性能台架试验在中国农业大学工学院室内环境下进行,试验对象为符合前文统计数据的新鲜西兰花植株,植株状态满足采收要求。试验分为对比组和试验组,每组为 10 株,其中成熟西兰花与未成熟西兰花的比例为 9: 1。参照前文统计的西兰花种植与采收农艺,将两组西兰花植株分别按照单垄双行、交错种植的模式进行放置,其中放置行距为 400 mm、株距为 300 mm,垄高为 200 mm。

在试验时,为了验证所设计的西兰花检测算法的有效性,并采取遮光装置的必要性,首先利用对比组进行试验。通过控制西兰花采收作业平台从西兰花植株上方通过,依次对每株西兰花进行图像采集、识别、检测及定位。检测结果表明,在未采取遮光的条件下,对比组中西兰花检测效果较差,仅有 2 株西兰花被成功检测及定位;而在遮光条件下,对比组内所有西兰花均被成功检测和定位,检测效果优异。因此,在西兰花采收时采取适当的遮光方式对提高作业精度具有重要影响。西兰花选择性采收作业平台的作业过程如图 16 所示,采收作业平台通过停车检测、植株寻位、花球定位、茎秆切割、花球运输以及花球释放等步骤,能够顺利完成西兰花花球的采收任务,采收效果良好。

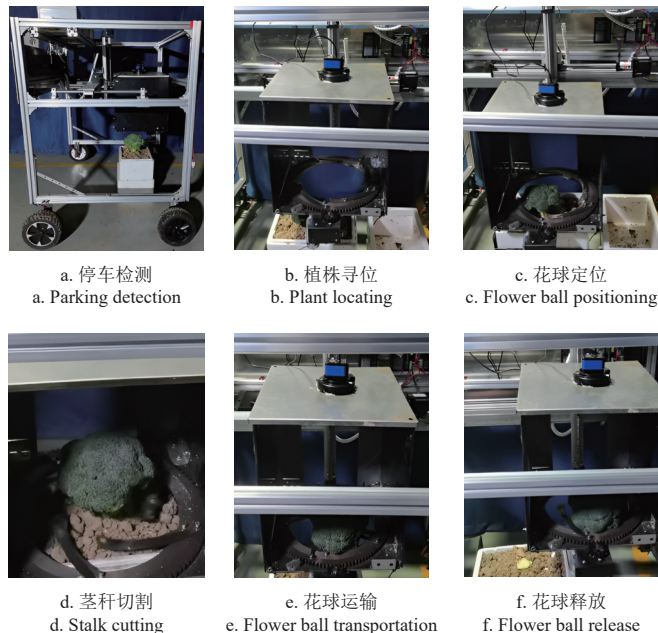


图 16 西兰花选择性采收作业平台作业过程

Fig.16 Operation process of selective harvesting platform for broccoli

之后,通过对试验组中的西兰花植株进行采收,视觉系统检测效果良好,绝大部分花球被成功检测,仅个别花球受叶片干扰或图像分割时出现错误,导致整个花球未能成功检测定位,从而导致割刀对中不准从而切割失败。经过西兰花选择性采收作业平台采收后的西兰花植株茎秆切割表面整齐光滑,周围茎叶被压断,花球无

损伤。依次对试验组内全部西兰花进行采收,测量并统计的采收数据如表 4 所示。

表 4 西兰花采收试验数据  
Table 4 Experimental data on broccoli harvesting

编号 Number	是否识别定位 Identify and locate or not	是否成功切割 Successful cutting or not	茎秆保留长度 Stalk retention length/mm
1	Y	Y	82.0
2	Y	Y	73.0
3	Y	N (定位错误)	/
4	Y (未成熟)	/	/
5	Y	Y	71.0
6	Y	Y	95.0
7	Y	Y	80.0
8	Y	Y	84.0
9	Y	Y	88.0
10	Y	Y	85.0

利用式 (15)、式 (16) 和式 (17) 分别计算采收过程中的漏收率、切茎合格率和检测准确率,从而获得西兰花采收作业平台的性能指标。

漏收率  $Q_p$  为

$$Q_p = \frac{N_p}{N} \times 100\% \quad (15)$$

式中  $N_p$  为符合采收标准但未被切割的西兰花数量;  $N$  为测试区内的西兰花总数。

切茎合格率  $Q_c$  为

$$Q_c = \frac{N_c}{N_d} \times 100\% \quad (16)$$

式中  $N_c$  为被成功切割的西兰花数量;  $N_d$  为满足采收标准的西兰花总数。

检测准确率  $Q_v$  为

$$Q_v = \frac{N_v}{N} \times 100\% \quad (17)$$

式中  $N_v$  为被成功检测定位的西兰花数量。

通过计算可知,本研究所设计的西兰花选择性采收作业平台漏收率在 10% 以下,检测准确率为 90%,切茎合格率为 88.9%,采收作业性能良好,虽然偶尔出现花球定位错误导致割刀对中不准从而切割西兰花茎秆失败现象,但其已达到了初步的预期效果,后续通过算法优化、处理器升级和更改相机等措施可进一步提升作业性能。综上所述,本研究所设计的西兰花选择性采收作业平台能够实现基于西兰花成熟度的选择性收获,具有较高的检测精度和切茎合格率,定心切割机构切割性能良好,切割过程花球无损伤,可满足西兰花选择性采收的作业需求。

## 5 结 论

1) 本文基于西兰花的农艺特性与形态特征设计了一种西兰花选择性采收作业平台,其主要由行走系统、识别切割装置、触发收集装置和控制系统等组成,可以实现对成熟西兰花的自主识别切割作业。

2) 通过对采收作业平台的关键部件进行设计与选型,

建立了西兰花的视觉识别系统和定心切割机构。根据茎秆与割刀之间的作用关系, 采用对数螺线作为切割曲线设计了一种等滑切角割刀, 确定了割刀滑切角  $40^\circ$ 、切割半径 135 mm、割刀长度 260 mm 等关键切割参数。

3) 根据西兰花茎秆的材料属性参数, 基于 ANSYS Workbench/LS-DYNA 软件对茎秆切割过程进行了显式动力学仿真分析, 利用正交试验优化设计确定了茎秆切割过程的最优参数组合为割刀刃角  $20^\circ$ 、转速 1 rad/s, 此时理论最大切割力为 725.82 N。

4) 西兰花采收作业平台性能试验表明, 视觉系统能够有效识别自然环境下的成熟西兰花植株, 检测效果好; 定心切割机构可快速平稳的切入并切断西兰花茎秆, 切断表面平整光滑; 采收作业平台整体漏收率在 10% 以下、检测准确率为 90%、切茎合格率为 88.9%, 采收作业性能良好, 可满足西兰花选择性采收的作业需求。

#### [参 考 文 献]

- [1] SAMEV D, SALOPEK-SONDI B. Cruciferous (brassicaceae) vegetables[M]. Nonvitamin and Nonmineral Nutritional Supplements, London: Academic Press, 2019: 195-202.
- [2] 罗淑芬, 郭峰, 孙莹, 等. 6-苄氨基嘌呤处理对鲜切西兰花硫代葡萄糖苷代谢的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 295-304.  
LUO Shufen, GUO Feng, SUN Ying, et al. Effects of 6-benzylaminopurine treatments on the glucosinolate metabolism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(13): 295-304. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈建能, 陈礼群, 喻陈楠, 等. 基于最小切块应力的西兰花切块加工刀具参数优化研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 42-48.  
CHEN Jianneng, CHEN Liqun, YU Chennan, et al. Study on blade parameter optimization analysis of broccoli cuts based on minimum slice stress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(23): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- [4] GARCIA-MANSO A, GALLARDO-CABALLERO R, GARCIA-ORELLANA C J, et al. Towards selective and automatic harvesting of broccoli for agri-food industry[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 188: 106263.
- [5] 彭彦昆, 孙晨, 赵苗, 等. 苹果品质动态无损感知及分级机器人手系统[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 293-303.  
PENG Yankun, SUN Chen, ZHAO Miao, et al. Dynamic nondestructive sensing and grading manipulator system for apple quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(16): 293-303. (in Chinese with English abstract)
- [6] 朱贺, 杨华, 尹周平. 纹理表面缺陷机器视觉检测方法综述[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(8): 1293-1315.
- ZHU He, YANG Hua, YIN Zhouping. Review of machine vision detection methods for texture surface defects[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023, 42(8): 1293-1315. (in Chinese with English abstract)
- [7] TANG Y C, CHEN M Y, WANG C L, et al. Recognition and localization methods for vision-based fruit picking robots: A review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 510.
- [8] 陈青, 殷程凯, 郭自良, 等. 苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4): 1-15.  
CHEN Qing, YIN Chengkai, GUO Ziliang, et al. Current status and future development of the key technologies for apple picking robots[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(4): 1-15. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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, 51(9): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- [10] VAN HENTEN E J, HEMMING J, VAN TUIJL B A J, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. *Autonomous Robots*, 2002, 13(3): 241-258.
- [11] VAN HENTEN E J, VAN TUIJL B A J, HEMMING J, et al. Field test of an autonomous cucumber picking robot[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 86(3): 305-313.
- [12] DE PRETER A, ANTHONIS J, DE BAERDEMAEKER J. Development of a robot for harvesting strawberries[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(17): 14-19.
- [13] ARAD B, BALENDONCK J, BARTH R, et al. Development of a sweet pepper harvesting robot[J]. *Journal of Field Robotics*, 2020, 37(6): 1027-1039.
- [14] 赵德安, 吴任迪, 刘晓洋, 等. 气电混合驱动全天候苹果收获机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 21-28, 36.  
ZHAO Dean, WU Rendi, LIU Xiaoyang, et al. Design and experiment of apple harvesting robot based on gas-electric hybrid drive[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 21-28, 36. (in Chinese with English abstract)
- [15] 徐丽明, 刘旭东, 张凯良, 等. 脐橙采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 53-61.  
XU Liming, LIU Xudong, ZHANG Kailiang, et al. Design and test of end-effector for navel orange picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(12): 53-61. (in Chinese with English abstract)



- [16] WILHOIT J H, VAUGHAN D H. A powered cutting device for selectively harvesting broccoli[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1991, 7(1): 14-20.
- [17] SHEARER S A, JONES P T, CASADA J H, et al. A cut-off saw mechanism for selective harvest of broccoli[J]. *Transactions of the ASAE*, 1991, 34(4): 1623-1628.
- [18] BLOK P M, BARTH R, VAN DEN BERG W. Machine vision for a selective broccoli harvesting robot[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2016, 49(16): 66-71.
- [19] BLOK P M, EVERT F K, TIELEN A P M, et al. The effect of data augmentation and network simplification on the image-based detection of broccoli heads with Mask R-CNN[J]. *Journal of Field Robotics*, 2021, 38(1): 85-104.
- [20] XU H M, YU G H, NIU C Y, et al. Design and experiment of an underactuated broccoli-picking manipulator[J]. *Agriculture*, 2023, 13(4): 848.
- [21] 刘伟明, 林俊, 汪恩国, 等. 主要栽培技术对西兰花产量与品质的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 274-280.  
LIU Weiming, LIN Jun, WANG Enguo. Effect of main cultural techniques on production and quality of broccoli[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(15): 274-280. (in Chinese with English abstract)
- [22] 高庆生, 陈永生, 管春松, 等. 西兰花生产现状、存在的问题及建议[J]. 蔬菜, 2020(11): 29-31.  
GAO Qingsheng, CHEN Yongsheng, GUAN Chunsheng, et al. Production status, problems and suggestions of broccoli[J]. *Vegetables*, 2020(11): 29-31. (in Chinese with English abstract)
- [23] 常数数. 西兰花采收装置的设计与试验[D]. 浙江: 浙江理工大学, 2019.  
CHANG Shushu. Design and test of Broccoli Harvesting Device[D]. Zhejiang: Zhejiang Sci-Tech University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [24] 贾伟宽, 赵德安, 阮承治, 等. 苹果采摘机器人夜间图像降噪算法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 219-226.  
JIA Weikuan, ZHAO Dean, RUAN Chengzhi, et al. Denoising algorithm of night vision image for apple harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(10): 219-226. (in Chinese with English abstract)
- [25] WU X J, GAO G M. LED light design method for high contrast and uniform illumination imaging in machine vision[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): 1694-1704.
- [26] 赵雄, 徐港吉, 陈建能, 等. 基于 Laws 与 Gabor 滤波的田间西兰花花球识别技术[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 313-322.
- ZHAO Xiong, XU Gangji, CHEN Jianneng. Field broccoli head recognition technology based on Laws and Gabor filter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(4): 313-322. (in Chinese with English abstract)
- [27] BECKER G S, LOVAS R. Uniformity correction of CMOS image sensor modules for machine vision cameras[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9733.
- [28] 钱君, 马少春, 徐杨, 等. 滑剪组合式甘蔗根切装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 37-47.  
QIAN Jun, MA Shaochun, XU Yang, et al. Design and test of sliding shear combined sugarcane basecutter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(10): 37-47. (in Chinese with English abstract)
- [29] 郑智旗, 何进, 李洪文, 等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(z1): 108-116.  
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(z1): 108-116. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘鹏, 何进, 李艳洁, 等. 异速对辊式玉米秸秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 69-79.  
LIU Peng, HE Jin, LI Yanjie, et al. Design and experiment of double rollers maize stalk chopping device with different rotation speeds[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(14): 69-79. (in Chinese with English abstract)
- [31] 郭茜, 张西良, 徐云峰, 等. 藤茎类秸秆专用切割刀片的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 47-53.  
GUO Qian, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. Design and experiment of cutting blade for cane straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(24): 47-53. (in Chinese with English abstract)
- [32] 康峰, 仝思源, 张汉石, 等. 苹果枝条往复切枝参数分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 9-16.  
KANG Feng, TONG Siyuan, ZHANG Hanshi, et al. Analysis and experiments of reciprocating cutting parameters for apple tree branches[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(16): 9-16. (in Chinese with English abstract)

## Design and experiment of the identification cutting devices for a selective harvesting platform of broccoli

SONG Hao<sup>1</sup>, ZHANG Xuemin<sup>1,2✉</sup>, XIE Pengfei<sup>1</sup>, CHEN Xiang'an<sup>1</sup>, LIU Siyao<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment Optimization Design, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Broccoli (*Brassica oleracea* L.var.Italica Plenck) is one of the most important vegetables in recent years. However, manual batch harvesting cannot fully meet the high requirement of selective harvesting, due to the strong seasonal labor demand, high labor intensity, and high cost. In this study, a selective harvesting platform was designed to automatically identify and then cut the broccoli, according to the agronomic properties and morphologies. Firstly, the selective harvesting platform primarily consisted of a walking module, identification in cutting device, triggering collection device, and control system. The control system was acquired for the visual information of broccoli through the upper computer. The lower computer was used to control the overall functioning of the harvesting platform, including overall walking, plant localization, flower ball positioning, stalk cutting, and flower ball grasping. Secondly, an "identify-harvesting" integrated operation mode was designed to autonomously identify and cut operations in the broccoli selective harvesting platform. This operational mode was used to mitigate the interference from independent movements of the executing mechanisms during identification. The precise movement distances of executing mechanisms were calculated to enhance the operational accuracy. The key components of the harvesting platform were selected for the visual identity system and centering cutting mechanism for broccoli. The original image of broccoli was collected by the visual system and then processed through grayscale conversion, Gaussian filtering, and threshold segmentation. Thirdly, the dimension and centroid position of the broccoli head were calculated using pixel area and moment. A better performance was achieved in the image processing time of 2.5 s, the average contour deviation of 2.2%, and the measurement centroid position error of 4.2%. According to the interaction between the broccoli stalks and the cutting knife, a logarithmic spiral was utilized as the cutting curve, in order to design a constant slip angle cutting knife. The key cutting parameters were determined, such as a cutting knife sliding angle of 40°, a cutting radius of 135 mm, and a cutting knife length of 260 mm. Additionally, the explicit dynamic simulation of stalk cutting was conducted using ANSYS Workbench/LS-DYNA software, according to the material property parameters of broccoli stalks. Taking the cutting knife edge angle and rotational speed as the control factors, and the maximum cutting force as the experimental indicator, the optimal parameter combination of the stalk cutting was determined by the orthogonal experimental optimization. An optimal combination was obtained in the cutting knife edge angle of 20° and rotational speed of 1 rad/s. The maximum cutting force was 725.82 N, indicating better cutting quality. Finally, the cutting performance test showed that the centering cutting mechanism rapidly and smoothly cut into and cut off broccoli stalks, where the cutting surface was flat and smooth, with a cutting time of approximately 0.6 s per unit, and the 100% success rate of cutting. The performance tests on the harvesting platform showed that the visual system effectively recognized the mature broccoli plants in natural environments with better detection. The overall leakage rate of the harvesting platform was less than 10%, the detection accuracy was 90%, and the qualified rate of cutting stalks was 88.9%, fully meeting the operational requirements of selective harvesting of broccoli. This finding can provide the theoretical and practical reference for the design and development of selective harvesting equipment for broccoli.

**Keywords:** harvest; agricultural machinery; machine vision; broccoli; cutting devices; explicit dynamics