doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.010

立体层架栽培香菇选择性采摘机器人设计与试验

孙琦鑫[1,2]　赵树龙[1,2]　周　硕[1,3]　管仁来[4]　柴秀娟[1,3]

(1.中国农业科学院农业信息研究所,北京 100081;2.淄博数字农业农村研究院,淄博 255000;
3.农业农村部农业大数据重点实验室,北京 100081;4.威海福瑞机器人有限公司,威海 264200)

摘要:针对立体层架式栽培中香菇人工采摘劳动强度大、成本高、选择性采摘机器人研究不足等问题,结合香菇生长特性与工厂化农艺要求,本文设计了一种集自主移动、菌棒取放、选择性采摘与收集于一体的香菇采摘机器人。针对多层立体种植结构,设计升降-夹持机构,通过升降平台与丝杆模组的联动,实现不同层内菌棒的无损取放与夹持固定。采用多视角视觉系统获取菌盖表型与菌褶开合状态信息,通过改进的 YOLO v8 模型与基于几何约束的跨视角目标匹配规则,实现待采香菇的识别与定位。为避免采摘过程中对菌盖及菌棒造成损伤,依据香菇形态与受力特性,仿人工动作设计夹持末端执行器,通过菌柄侧向夹持施力,实现分离采摘。在立体层架种植菇房内的实地试验结果表明,该机器人香菇采摘成功率达 91.6%,单果平均采摘耗时为 16.5 s,损伤率为 15.9%。

关键词:香菇;采摘机器人;末端执行器;升降-夹持机构;多视角视觉;立体层架栽培

中图分类号:TP242;TP391.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)13-0140-09　　**OSID**:

Design and Implementation of Robotic System for Selective Harvesting of Shiitake Mushrooms in Three-dimensional Shelf Cultivation

Sun Qixin[1,2]　Zhao Shulong[1,2]　Zhou Shuo[1,3]　Guan Renlai[4]　Chai Xiujuan[1,3]

(1. *Agricultural Information Institute*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100081, *China*
2. *Zibo Institute for Digital Agriculture and Rural Research*, *Zibo* 255000, *China*
3. *Key Laboratory of Agricultural Big Data*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100081, *China*
4. *Weihai Furui Robotics Co.*, *Ltd.*, *Weihai* 264200, *China*)

Abstract: In response to the problems in three-dimensional shelf cultivation of shiitake mushrooms, such as high labor intensity, high cost of manual picking, and insufficient research on selective picking robots, an integrated shiitake picking robot was proposed that combined autonomous movement, mushroom stick handling, selective picking and shiitake collection, taking into account the growth characteristics of shiitake mushrooms and the agronomic requirements of factory-based production. To adapt to the multi-layer three-dimensional shelf structure, a lifting-clamping mechanism was developed. Through the linkage between the lifting platform and the lead screw module, this mechanism enabled the non-destructive handling and clamping fixation of mushroom sticks in different layers, effectively solving the problem of handling mushroom sticks in multi-layer shelf environments that were both difficult and prone to damage. A multi-view vision system was adopted to collect multi-dimensional information, including the phenotypic characteristics of shiitake caps and the opening-closing state of gills. An improved YOLO v8 model was used to enhance the accuracy of target detection, and a cross-view target matching rule based on geometric constraints was designed to associate the detection results of different views. This combination enabled the accurate identification and positioning of shiitake mushrooms that were ready for picking, laying a foundation for subsequent selective picking operations. To avoid damage to shiitake caps and mushroom sticks during the picking process, a clamping end-effector was designed by simulating manual picking actions based on the morphological characteristics and force-bearing properties of shiitake

收稿日期:2025-10-22　修回日期:2026-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目(62406327)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(JBYW-AII-2025-13)和中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-2025-AII)

作者简介:孙琦鑫(1993—),女,副研究员,博士,主要从事农业智能感知与应用研究,E-mail:sunqixin@caas.cn

通信作者:柴秀娟(1978—),女,研究员,博士生导师,主要从事农业智能感知与智能装备研究,E-mail:chaixiujuan@caas.cn

mushrooms. By applying a lateral clamping force on the shiitake stipes, the end-effector achieved the separation and picking of shiitake mushrooms without causing damage to the caps or affecting the subsequent growth of mushroom sticks. The field experimental results indicated that the picking success rate of the robot reached 91.6%, with an average picking time of 16.5 s per shiitake mushroom and a damage rate of 15.9%.

Key words: shiitake mushroom; picking robot; end-effector; lifting-clamping mechanism; multi-view vision; three-dimensional shelf cultivation

0　引言

中国作为全球最大的食用菌生产、消费和出口国[1]，2023 年食用菌总产量超过 4 334 万吨，产值突破 3 900 亿元。其中，香菇作为食用菌产业的核心品种，凭借其独特的香气与丰富的营养价值[2-3]，连续多年位居我国食用菌产量首位。在工厂化香菇种植中，袋料栽培模式虽然从基质制备到接种出菇环节实现了机械化作业[4]，但采收环节仍高度依赖人工，成为制约产业高质量发展的关键因素[5]。

目前，菇类采摘机器人的研究主要集中在菇床栽培的双孢菇和菌棒栽培的香菇上。在双孢菇采摘方面，Catha[6] 发明的收获装置和荷兰 Van 等[7] 的双孢菇收获机均采用刀片切割的采收方式，虽具备较高的采摘效率，但会对蘑菇品质造成损伤；扬州大学易山林[8] 设计的采摘机器人以三指手爪为末端执行器，仍难以避免对菌盖造成损伤。针对上述问题，Huang 等[9] 研制气吸式采摘末端，以气流吸附替代传统机械夹持；Yang 等[10] 以真空负压为核心采摘技术，在提高双孢菇采摘效率的同时控制了破损率；姬江涛等[11] 研发了柔性仿生吸盘，以纯柔性接触降低损伤风险；Zhong 等[12] 则在柔性负压技术上进一步优化，研制柔性负压仿生吸盘，进一步减少菌盖损伤。相比之下，香菇采摘机器人的研究起步较晚，技术发展较为滞后。Tao 等[13] 提出菌棒评估方法并研制了香菇批次性采收机[14]，实现了高效快速采收。然而，由于缺乏对香菇个体的识别与精准作业能力，难以满足选择性采摘的需求。针对这一问题，农业农村部南京农业机械化研究所[15] 设计了一种香菇采摘装置，利用真空吸引式采摘方式避免采收过程中的机械损伤；山东省农业科学院[16] 发明了层架式菌棒栽培香菇采摘分级一体化机器人，可对单个菌棒进行采摘与采后分级；北京市农林科学院智能装备技术研究中心[17] 设计了菇柄自适应定位的套筒式香菇采摘执行器，通过精准切断菌柄完成采摘。然而，这些研究只停留在概念设计或仿真阶段，尚未见有公开报道的原型样机及实地试验验证。

本研究以立体层架式栽培的香菇为研究对象，针对工厂化生产中缺乏选择性香菇采摘机器人、单视角视觉识别难以兼顾菌盖与菌褶状态、香菇及菌棒易损伤等一系列问题，开展核心机构设计，研制集菇架间自主移动、菌棒取放、选择采摘和香菇收集于一体的采摘机器人。

1　香菇采摘机器人总体设计方案

1.1　立体层架式种植模式及特性分析

立体层架式种植的香菇大棚如图 1 所示，能够有效利用棚内空间，提高生物转化率，同时具有便于批次化出菇管理和个体生长品质稳定等优点。菇架间距通常控制在 1 m 以内，层高按标准设计为 20 cm，在保障基本作业空间的前提下，避免层高过低抑制出菇品质或过高浪费空间，从而实现单位面积产量的最大化。此外，香菇能否采摘主要依据菌盖表型特征和菌褶开伞状态，及时采摘成熟香菇并确保菌棒结构无破损，能够维持菌棒可持续生产。



图 1　立体层架式香菇种植场景

Fig. 1　Three-dimensional shelf shiitake mushroom cultivation scenario

菌棒取放、香菇采摘等核心机构的结构设计与菌棒及香菇的物理特性密切相关。因此，本文在山东七河生物科技股份有限公司的工厂化种植大棚内，随机选取了 35 个处于出菇期的菌棒，对其尺寸以及附着生长的香菇的几何与力学特性进行系统测量与统计分析，结果如图 2 所示。

测量结果显示，菌棒长度范围为 350 ~ 400 mm，平均值为 372 mm；直径范围为 76 ~ 100 mm，平均值为 90 mm，整体尺寸分布集中。附着生长的香菇，菌柄长度为 15 ~ 41 mm，均值为 26 mm；菌柄直径为 9 ~ 19 mm，均值为 14 mm；菌盖直径为 45 ~ 65 mm，均值为 53 mm，可见同批次香菇个体的几何参数较为稳定。采用推拉力计对其中成熟待采香菇的采摘

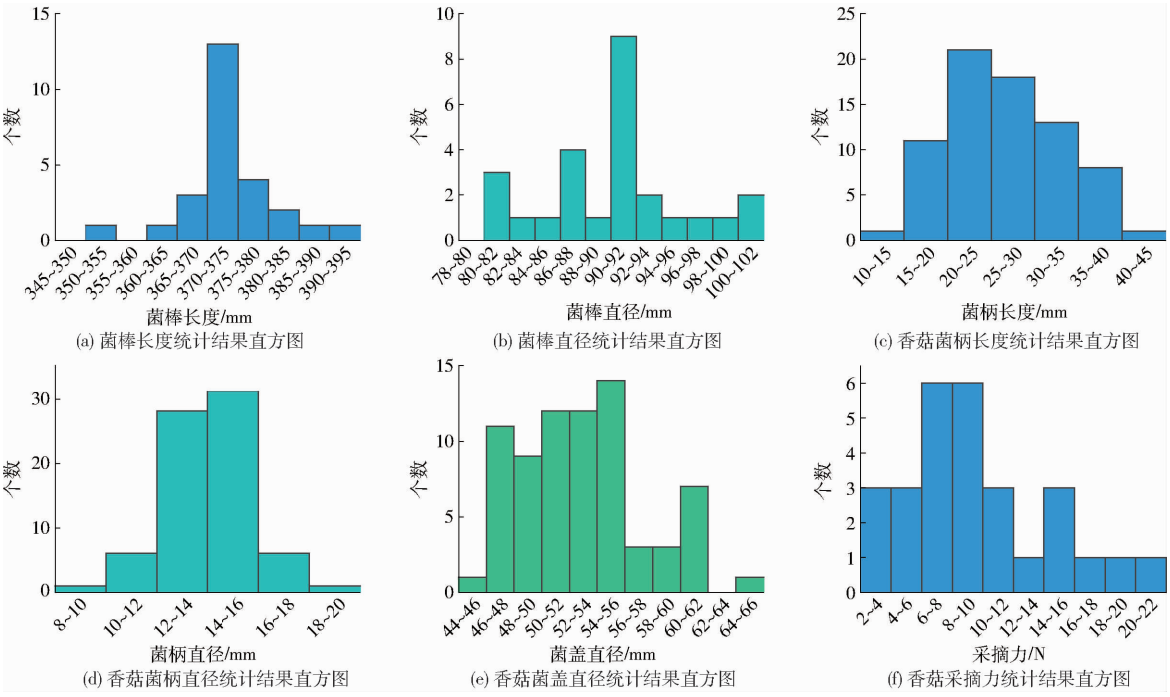

图 2 菌棒、香菇几何参数及采摘力参数统计图

Fig. 2 Statistical charts of geometric parameters and picking force parameters of spawn sticks and shiitake mushrooms

分离力进行直接测定,其分离力分布范围为 4 ~ 21 N, 平均值为 10 N,整体力学水平处于较低区间。上述数据,为核心机构的设计及力度控制策略的制定提供了数据参考。

1.2 整机设计方案

根据大棚内立体层架式种植方式,结合实际采摘需求,研制了一种香菇采摘机器人,其整体机构如图 3 所示,基本参数如表 1 所示。该机器人由移动底盘、菌棒升降-夹持机构、多视角识别系统和采摘执行机构等部分组成。其中,移动底盘行走轮采用伺服电机驱动的双支撑舵轮,可实现 360°回转与横向移动能力,兼具高灵活性与高运行精度。同时,底盘集成了整机的电控系统,承担设备的自主移动与电力供应。菌棒升降-夹持机构由一组同步升降模组、直线丝杆滑台和双向正反牙丝杆滑台等构成,用以实现换层作业,保证菌棒能够平稳地抽出、起降和放回,维持设备作业稳定性。视觉系统由 1 台深度相机和 2 台 RGB 相机构成,实现兼顾菌盖与菌褶多维信息的香菇目标识别与定位。采摘执行机构由机械臂和末端执行器组成,为减少采摘过程中对目标香菇菌盖及所在菌棒的损伤,设计了柔性夹持式采摘末端,机械臂则选用四轴关节结构,具有速度快、控制精度高的优势。

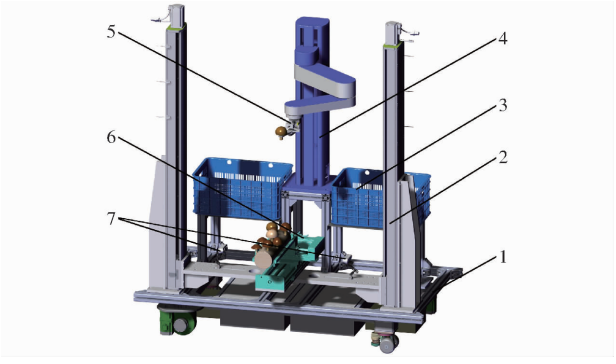

图 3 香菇采摘机器人结构示意图

Fig. 3 Schematic of structure of shiitake mushroom picking robot

1. 底盘 2. 升降模组 3. 收集筐 4. 机械臂 5. 采摘末端执行器 6. 菌棒夹持机构 7. RGB 相机

表 1 香菇采摘机器人基本参数

Tab. 1 Basic parameters of shiitake mushroom picking robot

参数	数值
整机质量/kg	430
长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	1 400 × 780 × 1 700
最小离地间隙/mm	50
最大行走速度/($m \cdot s^{-1}$)	0.7
转弯半径/mm	0

1.3 工作流程

香菇采摘机器人的基本工作流程如图 4 所示,具体过程为:机器人在待采菌架前停稳,升降模组带动菌棒夹持模块移动到待取菌棒前,菌棒夹持模块张开,夹持臂沿菌棒中下部空位伸入到菌架内,夹持臂收紧夹住菌棒,升降模组将菌棒抬起,然后夹持臂收回,将菌棒带出,并下移到作业位置。随后,机械臂带动末端移动到菌棒上方 30 cm 处,此时末端底部的相机及菌棒两侧的相机对菌棒拍照识别,机械

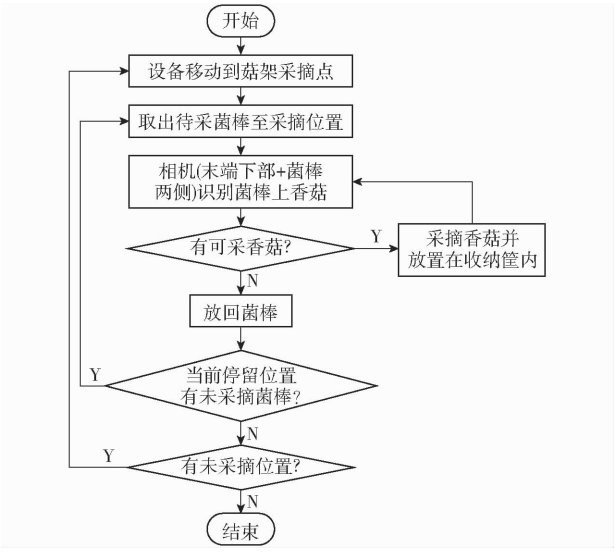

图 4　香菇采摘机器人工作流程图

Fig. 4　Workflow of shiitake mushroom harvesting robot

臂根据识别到的成熟可采摘香菇位置信息，控制采摘末端执行器移动到相应位置，按顺序采摘后将香菇放置到收集筐内。待菌棒上可采摘香菇采摘完成后，根据菌棒拿取工作倒序将菌棒放回，至此该菌棒的采摘动作完成。随后，菌棒夹持机构移动到下一个待采菌棒前，继续循环采摘动作。当停留位置没有待采菌棒时，机器人移动到下一个作业工位，重复循环上述作业流程，直到没有需要采摘的菌棒。

2　关键部件结构设计

2.1　菌棒升降-夹持机构设计

菌棒升降-夹持机构是实现立体层架种植环境下菌棒安全取放的核心执行单元，其工作性能直接影响菌棒结构的完整性与采摘作业的可靠性，是保障菌棒持续出菇能力的关键。该机构将菌棒夹持模块搭载至升降平台上，构成集垂直移动与稳定夹持功能于一体的执行单元。

升降平台采用伺服电机同步驱动丝杆结构，实现菌棒夹持机构在垂直方向上的平稳移动及换层作业，适配标准化立体菇架结构。该设计将 Z 轴方向上的移动交由升降平台承担，避免香菇采摘过程中机械臂在 Z 轴上进行大幅度移动，从而降低因机械臂姿态变化导致的整机重心偏移的风险，提升整机作业的稳定性。

夹持模块作为菌棒升降-夹持机构的关键执行部件，负责菇架上菌棒的取放与采摘过程中菌棒的固定，其结构如图 5 所示。该模块由伺服电机通过同步带提供动力，一方面，将动力传递至直线丝杆模组，带动菌棒夹持悬臂沿 X 轴方向实现前后伸缩移动，确保夹持模块能够顺利伸入层架内部完成菌棒取放操作；同时，伺服电机驱动正反牙丝杆模组，控制夹持悬臂的开合，实现菌棒取放及香菇采摘过程中的菌棒固定和柔性释放。夹持悬臂采用对称结构，内表面采用粗制处理，能有效增大接触摩擦力。

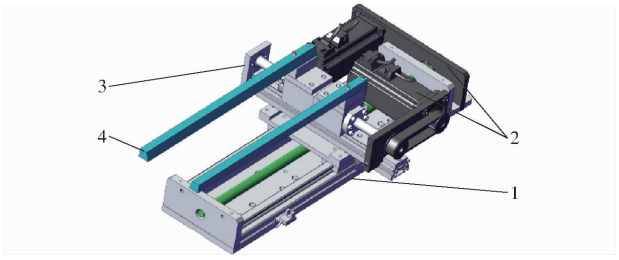

图 5　菌棒夹持模块结构图

Fig. 5　Schematic of spawnstick clamping mechanism

1. 直线丝杆模组　2. 动力部分　3. 正反牙丝杆模组　4. 菌棒夹持悬臂

结合上文测量的菌棒几何参数，夹持结构宽度设计为 150 mm，收放宽度范围设计为 70 mm，悬臂伸缩进程设计为 400 mm，能够适配常见菌棒尺寸及标准化菇架的结构规格，满足实际作业需求。

2.2　多视角信息融合的视觉感知系统

在香菇采摘机器人作业过程中，成熟待采目标的准确识别直接决定了采摘成功率。香菇独特的生物学形态对视觉感知系统提出了特殊要求：其成熟性判断不仅依赖于菌盖的表型特征（如形态、色泽），更取决于菌褶的开合状态，这与多数以外观色泽或几何尺寸为主要判据的果蔬采收[18]存在显著差异。为此，本文提出一种基于多视角信息融合的香菇成熟目标识别与定位方法，通过顶端深度相机获取菌盖形态与空间位置信息，结合左右对称安装的侧视 RGB 相机观测菌褶的展开程度，实现对香菇个体的多维度综合感知。

2.2.1　数据集构建

为构建覆盖香菇完整生长结构的多视角图像数据集，在实际工况下对目标菌棒进行系统化图像采集与数据标注。采集过程中，相机从菌棒正上方起始位置出发，以恒定角速度分别沿顺时针与逆时针方向匀速环绕菌棒录制视频，运动轨迹覆盖顶端俯视至侧下方 60°倾角范围，确保稳定捕获菌盖表型与菌褶开合状态信息。随后，对视频进行时序抽帧与图像质量筛选。最终，构建一个包含 820 幅菌棒不同视角图像的集合。

在数据标注阶段，结合实际生产中香菇采收标准，将香菇菌盖按照色泽与形态特征划分为白面、正常和畸形 3 类，将菌褶按照开合状态分为未开、微开和全开 3 类，如图 6 所示。为了提高标注效率，采用基于 Segment anything model（SAM）的半监督辅助标注策略。首先由 SAM 自动生成香菇实例掩模，随后由标注人员对掩模边界进行校正并补充类别标签，

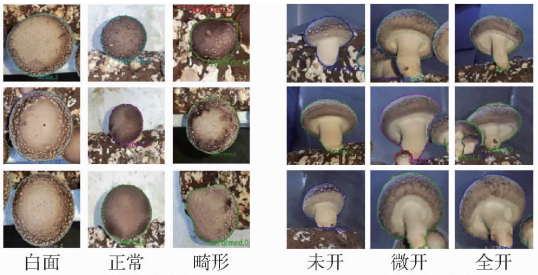

图 6 俯视及仰视视角下香菇不同生长状态示例图

Fig. 6 Examples of shiitake mushrooms at different growth stages from top and bottom views

此时,软件同步生成最小外接矩形框。最终,将标注好的图像随机划分为训练集与测试集,训练集图像数量为 700 幅,测试集为 120 幅,为后续成熟香菇的多视角融合识别提供兼具视角完备性与农艺相关性的训练基础。

2.2.2 基于改进 YOLO v8 的轻量化香菇目标检测模型

为兼顾算法推理效率与检测精度,满足算法在嵌入式终端上的部署需求,提出基于改进 YOLO v8 的香菇目标检测模型,对其多尺度检测头结构进行优化,如图 7 所示。考虑到香菇在图像中尺度分布较为集中,在保留原有骨干网络特征提取能力的基础上,移除了模型头部贡献度较低的 P3 层检测头、P5 层特征层及检测头,仅保留 P4 层的检测头作为模型唯一输出分支,构建单尺度目标检测架构。该设计在不牺牲关键尺度特征层表达基础上,显著降低模型参数量与计算复杂度,提升推理速度。训练过程中,检测框定位损失由 CIoULoss 和 Distribution Focal Loss 组成,以增强边界框回归精度;类别损失由 BCELoss 组成,提升分类准确性;采用 AdamW 优化器,提高模型收敛速度。

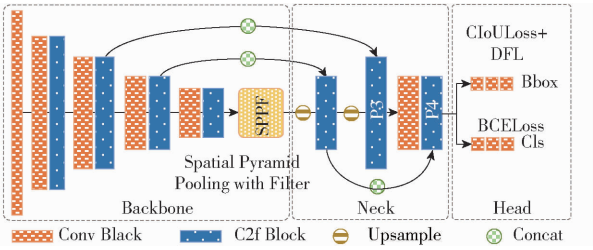

图 7 基于改进 YOLO v8 的轻量化香菇目标检测网络结构图

Fig. 7 Structure of lightweight shiitake mushroom object detection network based on improved YOLO v8

2.2.3 跨视角目标匹配与待采香菇识别定位

为实现待采香菇的精准识别,在香菇目标检测结果的基础上,提出基于几何约束的跨视角目标匹配规则,以建立菌盖与菌褶之间的目标对应关系。

具体来说,视觉系统首先将顶部俯视 RGB 图像及两侧仰视 RGB 图像组合为一个 batch,同步输入 2.2.2 节构建的目标检测模型中,得到同一菌棒在不同视角下的检测结果,即为 d(俯视)、ul(左仰视)和 ur(右仰视)。随后,依据相机安装及标定后的位置,构建以俯视视角检测结果为空间基准的跨视角几何映射规则。在完成三视角相机配准之后,将俯视图中检测到的菌盖目标按图像中线划分为左、右 2 个区域,分别记 dl 和 dr,并与左、右两侧的仰视图建立对应关系。然后,依据检测出的菌盖目标中心点与俯视图中线的距离,由小到大依次处理俯视图上的每一个菌盖目标,按照指定的范围在仰视图像中查找与其所匹配的菌褶目标。以 dr 和 ur 中的目标匹配为例,如图 8 所示。对于俯视图中的第 n 个菌盖目标 dr_n,其中心点坐标为(x_{dr_n},y_{dr_n}),检测框宽度为w_{dr_n}。在 ur 检测出的 m 个菌褶目标中查找所有满足横坐标x_{ur_m}与x_{dr_n}的绝对距离小于查找范围 F 的目标,即

$$|x_{ur_m} - x_{dr_n}| < F \tag{1}$$

其中,$F = 1.5w_{dr_n}$。随后,从筛选出的菌褶候选列表中选取中心点 y 轴坐标值最小的检测框(即空间位置最高、最靠近俯视图菌棒中线),作为与 dr_n 对应的匹配目标。这种映射规则有效确保了不同视角下检测目标的空间对应性。

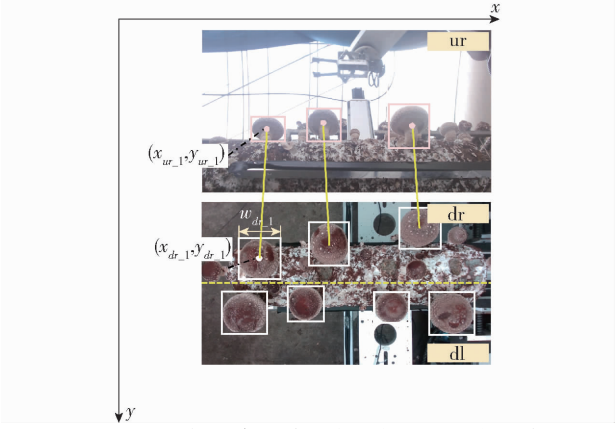

图 8 基于几何约束的跨视角目标匹配机制示意图

Fig. 8 Schematic of cross-view target matching mechanism based on geometric constraints

随后,视觉系统依据联合语义规则判断待采香菇。当香菇目标的菌盖类别与对应菌褶类别满足以下任一组合时,即被标记为待采目标:①菌盖类别为“白面”且菌褶类别为“未开”。②菌盖类别为“白面”且菌褶类别为“微开”。③菌盖类别为“正常”且菌褶类别为“未开”。④菌盖类别为“正常”且菌褶类别为“微开”。⑤菌褶类别为“全开”。其中,前 4 类为成熟适采目标,第 5 类为过熟目标。将过熟目标纳入采摘范围,旨在通过及时采收以避免其过度生长消耗菌棒养分,从而保障后续出菇品质。

最后,在完成待采香菇目标的筛选与标记后,

基于目标检测模型的输出结果对待采香菇进行特征点提取，并据此解算其对应的菌柄夹持空间坐标。具体而言，依据俯视图像所获得的香菇菌盖检测框，可提取每个香菇菌盖的 5 个关键点，如图 9 所示，分别是中心点以及沿长轴和短轴 2 条中心线分布的 4 个四分点。结合深度相机获取的对应深度帧，可得出上述关键点在相机坐标系中的空间坐标。其中，中心点对应香菇菌盖顶面中心的三维位置（c_x，c_y，c_z），而 4 个四分点则用于计算菌盖的平均直径。

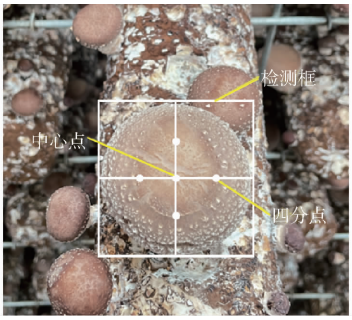

图 9　菌盖中心点及四分点示意图

Fig. 9　Schematic of center point and quartile points of cap

为确定适宜的菌柄夹持位置，还需确定菌盖厚度，并由此计算 Z 轴方向上的坐标。根据调研可知，菌盖厚度 t 与菌盖直径 d 之间呈近似线性关系，即 $t \approx kd$（针对本次试验品种，比例系数 k 取 0.6）。结合由视觉系统获取的菌盖平均直径，可推算出对应的菌盖厚度。在此基础上，以香菇菌盖顶面中心坐标为基准，沿 Z 轴方向向下偏移菌盖厚度 t，即可得到菌柄上端的空间坐标（c_x，c_y，p_z）。同时，考虑到夹持末端具有一定的厚度，为避免与菌盖发生碰撞并确保稳定夹持，引入微调变量 d'。因此，末端夹持菌柄的最终位置坐标为（c_x，c_y，p_z'），其中，$p_z' = c_z + t + d'$，如图 10 所示。最后，通过坐标系转换将相机坐标系下的待采香菇目标坐标转换为机械臂坐标系坐标，指导机械臂末端移动至菌柄夹持位置，完成采摘动作。

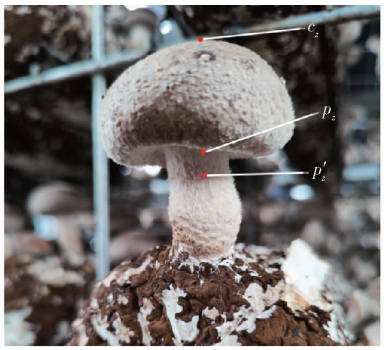

图 10　Z 轴方向上菌柄夹持位置示意图

Fig. 10　Schematic of clamping position of stipe in Z-axis direction

2.3　采摘末端执行器设计

末端执行器是香菇采摘机器人直接执行采摘操作的关键部件[19-23]，可通过施加可控力作用，实现香菇与菌棒的物理分离。由于香菇经济价值主要取决于菌盖品质，采摘过程需避免菌盖损伤以保障商品价值。香菇在菌棒上生长方向是竖直向上的，如图 11 所示。人工采摘时，作业者一只手固定菌棒，另一只手单指钩住菌柄根部，并沿菌柄的法线方向施加适度外力，即可实现香菇的自然脱落，如图 12 所示。若沿菌柄生长方向施力，不仅采摘阻力增大、操作困难，还易导致菌盖撕裂或菌棒受损，严重影响采摘菇品质与菌棒后续出菇能力。本文仿照人工采摘作业流程与香菇力学特性，设计了一种夹持采摘末端执行器。



图 11　菌棒上生长的香菇

Fig. 11　Growth of shiitake mushrooms on sticks



图 12　人工采摘作业

Fig. 12　Manual picking operation

夹持采摘末端执行器结构如图 13 所示，主要由连杆、滑块、电机、传感器等组成。整体材料选择铝合金 CNC 加工制成，具备良好的结构刚度与轻量化特点；驱动单元采用直流螺杆电机，具备输出力矩稳定和控制精度高的特点，满足采摘末端执行器对夹持力稳定性的要求与对目标精准定位采摘的需求。将负责获取菌盖信息及香菇位置的深度相机集成在末端执行器上，构建 Eye-in-hand 手眼协同系统，提升采摘过程中目标识别定位的实时性与准确性。在控制系统给出采摘指令后，机械臂带动采摘末端执行器移至待采香菇的菌柄处，使得连杆Ⅰ的夹持头在张开状态下位于香菇菌柄两侧。随后，连杆Ⅰ逐步闭合，实现对菌柄的稳定夹持。然后，机械臂带动

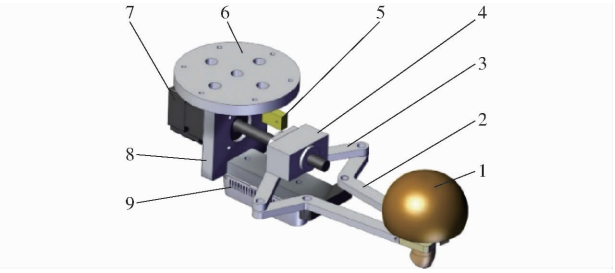

图 13 香菇采摘末端执行器结构图

Fig. 13 Schematic of shiitake picking end-effector

1. 香菇 2. 连杆Ⅰ 3. 连杆Ⅱ 4. 滑块 5. 传感器 6. 法兰 7. 电机 8. 末端基本框架 9. 深度相机

采摘末端执行器向着菌柄侧向用力,利用菌柄与菌棒连接部位不耐剪切特性,通过可控位移以较小的作用力实现香菇与菌棒的平稳分离。在完成采摘后,机械臂带动末端执行器移动至收集筐上方,通过控制连杆Ⅰ完全展开,使香菇在重力作用下自然落到收集筐内,完成采摘后收集。

结合上文测量的香菇几何参数及受力分析,为保证机器运行安全性、机动性,确定如图 14 所示的采摘末端执行器尺寸。其中,连杆Ⅰ长边 L_5 = 100 mm,短边 L_2 = 35 mm,夹角 α = 120°,连杆Ⅱ的 L_1 = 40 mm,两个连杆Ⅰ与末端基本框架铰接点间的距离 L_6 = 40 mm,在末端张开最大时 L_7 = 35 mm。

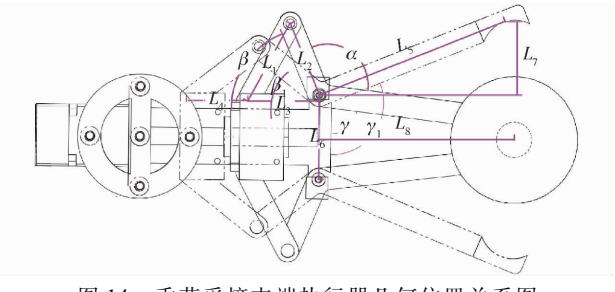

图 14 香菇采摘末端执行器几何位置关系图

Fig. 14 Geometric position diagram of shiitake picking end-effector

如图 15 所示,采摘时连杆Ⅰ夹紧角度 ξ 直接影响菌柄的受力,角度越小菌柄受到的夹紧力越小,角度越大菌柄受力越大。在图 2f 中,测量菌柄与菌棒的分离力最大为 20.09 N,为保证 F_x 满足菌柄强度,即 F_x < 20 N[24],代入公式

$$\begin{cases} F_y = 2F_f\cos\xi \\ F_f = \mu F_x \end{cases} \tag{2}$$

式中 F_x——连杆Ⅰ对菌柄的夹持力

F_y——菌棒对菌柄的剪切力

F_f——连杆Ⅰ上夹持头对菌柄的摩擦力

μ——夹持头和菌柄之间的摩擦因数,取 0.6

ξ——夹紧菌柄时单个连杆Ⅰ与采摘用力方向的夹角

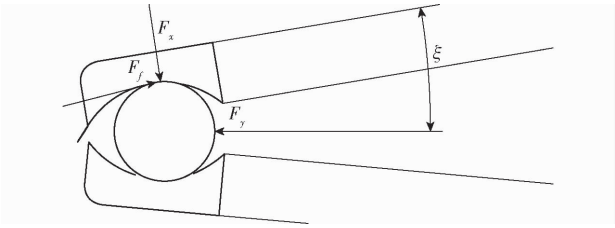

图 15 香菇菌柄受力分析示意图

Fig. 15 Schematic of force analysis on shiitake mushroom stipe

得到 ξ 需小于 33.6°。基于此,采摘末端执行器的 ξ 最大值设计为 12°,以满足菌柄强度及夹角范围。

同时,为了增强末端对不同品种香菇的适应性,设计了可更换不同尺寸夹持头的连杆Ⅰ,如图 16 所示,使得机器人能够更好地采摘菌柄直径范围在 8 ~ 30 mm 的香菇。



图 16 采摘末端执行器连杆Ⅰ夹持头更换结构示意图

Fig. 16 Schematic of replacement structure of gripper head for connecting rod Ⅰ of picking end-effector

1. 连杆Ⅰ 2. 夹持头

实际生产中香菇普遍呈现竖直向上生长,或仅在根部存在轻微弯曲。菌棒出菇前期是选择性采摘的主要作业窗口,此阶段菌丝活力强,菌柄发育充分,根部弯曲段占比小且远离夹持点,适采性强,当前末端设计可有效完成低损夹持。而在菌棒出菇后期,由于菌丝活力下降,香菇形态与品质通常不符合精准采收的农艺标准,因此不在本采摘机器人的设计与作业范围内。

3 试验验证

3.1 试验材料及方法

为验证香菇采摘机器人性能,于 2023 年 12 月在山东省淄博市淄川区山东七河生物科技股份有限公司的工厂化种植大棚内开展实地采摘试验。试验环境如图 17 所示,试验所用菌棒为七河生物 L2 菌棒。在大棚内随机选择 3 行菇架,每行包含 3 个独立菇架。随后,从每个菇架中随机选取一列中连续 4 个菌棒作为试验对象,即选取 9 列共 36 个菌棒进行采摘性能测试。试验过程中,采摘机器人首先移动至待采菇架前,随后进行菌棒拿取、香菇识别及采摘作业。

在本次试验中,以采摘成功率、单果采摘耗时和采摘损伤率 3 个指标[25]作为香菇采摘机器人的性能评价标准。其中,采摘成功率定义为成功采摘的



图 17　香菇采摘机器人试验场景

Fig. 17　Experiment scene of shiitake picking robot

香菇数量与本批次可采摘香菇总数百分比。鉴于该机器人连续作业的特点，单果采摘耗时定义为从机器人就位于目标列起始位置开始，依次完成各层待采菌棒的抽取、待采香菇的识别与采摘，以及菌棒回放等操作，直至该列待采菌棒均处理完毕，所用总时间除以该列实际采摘的香菇总数。该指标能够有效表征连续作业条件下的平均单果作业效率。采摘损伤率定义为受损伤个数与成功采摘香菇个数的百分比。损伤主要包括 2 类：①采摘损伤，即采摘过程中对待采目标香菇或邻近非目标香菇的菌盖造成剐蹭等机械损伤。②误采性损伤，指因识别错误，将尚未达到采摘条件的香菇误判为成熟香菇并进行采摘。

3.2　试验结果与分析

机器人在大棚内的香菇采摘作业过程如图 18 所示。首先，菌棒升降-夹持机构将目标菌棒从菇架中取出，如图 18a 所示。接着，机械臂带动采摘末端执行器移动到菌棒上方，如图 18b 所示。此时，安装在采摘末端执行器上及菌棒升降-夹持机构两侧的相机开始对菌棒拍照识别，获取可采摘香菇的位置信息。然后，根据待采香菇位于菌棒左侧或者右侧的位置信息，机械臂带动采摘末端执行器从菌棒侧面执行采摘，如 18c 所示。待菌棒上无满足采摘条件的香菇后，菌棒被送回原位。



(a) 取出菌棒　(b) 视觉识别　(c) 采摘香菇

图 18　香菇采摘作业过程

Fig. 18　Shiitake mushroom picking operation process

在采摘试验过程中，根据上述的性能评价标准，分别计算每列采摘的总耗时和成功率，结果如表 2 所示。机器人单果采摘平均耗时约为 16.5 s，采摘成功率平均为 91.6%。在试验过程中存在部分香菇未被成功采摘，其主要原因为菌棒疏蕾不充分，造成同一菌棒上香菇生长过于密集，从而导致采摘失败。

表 2　香菇采摘耗时和成功率统计结果

Tab. 2　Statistics of shiitake mushroom picking time and success rate

菇架编号	可采数量	采摘数量	采摘总耗时/s	单果平均耗时/s	成功率/%
1	20	18	333.6	18.5	90.0
2	25	23	371.1	16.1	92.0
3	31	27	402.0	14.9	87.1
4	20	19	359.7	18.9	95.0
5	30	27	404.7	14.9	90.0
6	34	32	438.4	13.7	94.1
7	19	17	350.5	20.6	89.5
8	23	21	370.2	17.6	91.3
9	24	23	391.8	17.0	95.8
总计	226	207			
平均			342.2	16.5	91.6

在成功采摘的 207 个香菇中，共出现 33 例损伤，其中包括采摘过程中造成的损伤 3 例和误采导致的损伤 30 例，总体损伤率为 15.9%。通过损伤样本分析可知，因为前期疏蕾不充分，加之香菇成熟期不一致，导致不同成熟阶段的香菇紧密相邻，进而在采摘过程中易将未成熟香菇连带摘下，造成误采性损伤，如图 19 所示。



图 19　采摘损伤示例

Fig. 19　Cases of picking damage

综合实地场景下试验结果表明，设计的香菇采摘机器人可以满足工厂化立体层架式香菇的采摘需求。

4 结论

(1)设计了一种适用于工厂化立体层架式香菇种植的选择性采摘机器人,该机器人由移动底盘、菌棒升降-夹持机构、多视角视觉系统、夹持采摘末端执行器等部件组成,能够实现菌棒取放、香菇识别定位、选择性采摘、收集放置等一整套自动化采摘流程。

(2)结合菌棒、香菇的尺寸特征与力学特性,设计了菌棒升降-夹持机构和仿人工作业的夹持采摘末端执行器,减少采摘过程对菌棒及香菇的损伤。

(3)提出一种多视角信息融合的识别与定位方法。利用基于改进的 YOLO v8 模型检测不同视角下的菌盖与菌褶目标,并结合几何约束的跨视角匹配进行多视角特征关联,从而实现适采香菇的精准判别与定位。

(4)香菇采摘机器人在实际工厂中试验结果表明,采摘成功率达 91.6%,单果平均耗时为 16.5 s,损伤率为 15.9%,满足工厂化立体层架栽培模式下对香菇选择性采摘的作业要求。

参 考 文 献

[1] 赵春艳,华蓉,董娇,等. 2019 年至 2022 年我国食用菌产量和种类概况分析[J]. 中国食用菌,2024, 43(5):101 - 105.
Zhao Chunyan, Hua Rong, Dong Jiao, et al. Chinese edible fungi yield and species distribution analysis from 2019 to 2022[J]. Edible Fungi of China, 2024, 43(5): 101 - 105. (in Chinese)

[2] 俞云燕,马高兴,段亚宁,等. 基于氨基酸及其理化特性分析食用菌替代蛋白的潜力[J]. 中国农业科学,2025, 58(15): 3097 - 3117.
Yu Yunyan, Ma Gaoxing, Duan Yaning, et al. The potential of alternative proteins from edible fungi based on amino acid and physicochemical characterization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(15): 3097 - 3117. (in Chinese)

[3] 李泰,卢士军,孙君茂,等. 26 种常见市售食用菌营养成分分析及评价[J]. 中国食用菌,2021, 40(12): 66 - 72.
Li Tai, Lu Shijun, Sun Junmao, et al. Analysis and evaluation of nutritional components of 26 common edible fungi in market [J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(12): 66 - 72. (in Chinese)

[4] 王明友,马士鑫,宋卫东,等. 香菇生产全程机械化装备配置方案[J]. 农业工程,2022, 12(9): 19 - 22.
Wang Mingyou, Ma Shixin, Song Weidong, et al. Whole process mechanized equipment configuration scheme for *Lentinula edodes*[J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(9): 19 - 22. (in Chinese)

[5] Zhou H Y, Wang X, Wesley A, et al. Intelligent robots for fruit harvesting: recent developments and future challenges[J]. Precision Agriculture, 2022, 23(5): 1856 - 1907.

[6] Catha M C. Method and apparatus for harvesting mushrooms and the like: US4545186[P]. 1985 - 10 - 08.

[7] Van D, Top H. Apparatus for harvesting mushrooms: US5035109[P]. 1991 - 07 - 30.

[8] 易山林. 工厂化种植双孢菇自动采摘系统关键技术研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.
Yi Shanlin. Research on key technologies of automatic picking system for industrial planting of *Agaricus bisporus* cultivation[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023. (in Chinese)

[9] Huang M, He L, Choi D, et al. Picking dynamic analysis for robotic harvesting of *Agaricus bisporus* mushrooms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185: 107156.

[10] Yang S, Ji J, Cai H, et al. Modeling and force analysis of a harvesting robot for button mushrooms[J]. IEEE Access, 2022, 10: 78519 - 78526.

[11] 姬江涛,李梦松,赵凯旋,等. 双孢菇柔性仿形采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023, 54(1): 104 - 115.
Ji Jiangtao, Li Mengsong, Zhao Kaixuan, et al. Design and experiment of flexible profiling picking end-effector for *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 104 - 115. (in Chinese)

[12] Zhong M, Han R Q, Liu Y, et al. Development, integration, and field evaluation of an autonomous *Agaricus bisporus* picking robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 1 - 12.

[13] Tao K, Liu J, Wang Z, et al. ReYOLO - MSM: a novel evaluation method of mushroom stick for selective harvesting of shiitake mushroom sticks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109292.

[14] Wang Z, Tao K, Yuan J, et al. Design and experiment on mechanized batch harvesting of Shiitake mushrooms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108593.

[15] 农业农村部南京农业机械化研究所. 一种香菇采摘装置:CN202310679263.9[P]. 2023 - 09 - 12.

[16] 山东省农业科学院. 一种层架式菌棒栽培香菇采摘分级一体化机器人:CN202211395047.3[P]. 2023 - 01 - 13.

[17] 北京市农林科学院智能装备技术研究中心. 菇柄自适应定位的套筒式香菇采摘执行器: CN202411866414.2[P]. 2025 -01 - 21.

[18] 刘洁,王一帆,马京奥,等. 基于 Roofline 理论的 YOLOv8 橙果识别模型轻量化改进[J]. 农业工程学报,2025,41(14): 184 - 193.
Liu Jie, Wang Yifan, Ma Jing'ao, et al. Optimizing orange fruit recognition model using Roofline theory and lightweight improved YOLOv8[J]. Transactions of the CSAE, 2025,41(14):184 - 193. (in Chinese)

(下转第 186 页)

487 – 495.
Shen Yanqing, Li Li, Li Yuanming, et al. Method for detection and localization of mulberry leaf harvesting and branch pruning based on improved YOLO v5[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 487 – 495. (in Chinese)
[36] 黄华,张存东,张晖旺,等. 基于 YOLO v8_EGW 的马铃薯种薯芽眼检测方法[J]. 农业机械学报,2025,56(8):458 – 466,506.
Huang Hua, Zhang Cundong, Zhang Huiwang, et al. Detecting method of potato seed bud eye based on YOLO v8_EGW[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 458 – 466,506. (in Chinese)
[37] Guo H, Chen H, Wu T. MSDP – Net: a YOLOv5-based safflower corolla object detection and spatial positioning network[J]. Agriculture, 2025, 15(8): 855.
[38] 白凯,张玉杰,苏邓文,等. 基于改进 YOLO v8n 的花生叶片病害检测方法[J]. 农业机械学报,2025,56(6):518 – 526,564.
Bai Kai, Zhang Yujie, Su Dengwen, et al. Peanut leaf disease detection method based on improved YOLO v8n[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 518 – 526,564. (in Chinese)
[39] 顾文娟,刘浩状,魏金,等. 基于 FPBW – YOLO v8 的复杂场景下番茄果实识别方法[J]. 农业机械学报,2025,56(8):467 – 478.
Gu Wenjuan, Liu Haozhuang, Wei Jin, et al. Tomato fruit recognition method in complex scenes based on FPBW – YOLO v8[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 467 – 478. (in Chinese)
[40] Chen B, Ding F, Ma B, et al. A method for real-time recognition of safflower filaments in unstructured environments using the YOLO – SaFi model[J]. Sensors, 2024, 24(13): 4410.
[41] 梁先明,倪帆,陈文洁,等. 基于时频 Grad – CAM 的调制识别网络可解释分析[J]. 西南交通大学学报,2024,59(5):1215 – 1224.
Liang Xianming, Ni Fan, Chen Wenjie, et al. Interpretable analysis of modulation recognition network based on time-frequency Grad – CAM[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(5): 1215 – 1224. (in Chinese)

(上接第 148 页)

[19] 林桂潮,郑晓鑫,曾文勇,等. 欠驱动式茶叶采摘末端执行器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2025, 56(1): 133 – 140.
Lin Guichao, Zheng Xiaoxin, Zeng Wenyong, et al. Optimal design and testing of under-actuated tea harvesting end-effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 133 – 140. (in Chinese)
[20] 赵雄,张号号,傅鸿妃,等. 切割脱离式鲜食朝天椒采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024, 55(10): 126 – 135.
Zhao Xiong, Zhang Haohao, Fu Hongfei, et al. Design and experiment of fresh peper picking end effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 126 – 135. (in Chinese)
[21] 马锃宏,余煌,谭励,等. 咬合式柑橘采摘末端执行器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2024, 55(10): 106 – 115, 125.
Ma Zenghong, Yu Huang, Tan Li, et al. Optimization design and test of occlusal end-effector for picking citrus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 106 – 115,125. (in Chinese)
[22] 虞浪,俞高红,吴浩宇,等. 欠驱动关节型柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报,2023, 39(17): 29 – 38.
Yu Lang, Yu Gaohong, Wu Haoyu, et al. Design and experiment of the end-effector with underactuated articulars citrus picking[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(17): 29 – 38. (in Chinese)
[23] 陈建能,陈倩雯,刘林敏,等. 旋转式两工位名优茶采摘收集一体末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024, 55(10): 136 – 144.
Chen Jianneng, Chen Qianwen, Liu Linmin, et al. Design and experiment of rotating two workstations integrated effector for famous tea picking and collection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 136 – 144. (in Chinese)
[24] 李锋. 鲜香菇菇柄切除设备试验研究[D]. 北京:中国农业科学院,2018.
Li Feng. Experimental study on shearing equipment of letinous edodes stipe[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)
[25] 董乃深,程泓超,应仇凯,等. 垄作草莓双臂采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2024, 55(增刊 1): 29 – 40,50.
Dong Naishen, Cheng Hongchao, Ying Qiukai, et al. Design and experiment of picking robot with dual arms for ground planting strawberries[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 29 – 40,50. (in Chinese)