doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.001

菇类采摘机器人研究现状和展望

王明友[1,2]　王　达[1]　宋卫东[1]　孙玉利[2]　张振烨[1]　赵鑫培[1]
（1. 农业农村部南京农业机械化研究所，南京 210014；2. 南京航空航天大学机电学院，南京 210016）

摘要：中国是世界上食用菌生产与消费第一大国。随着中国食用菌产业规模的持续扩大，传统的人工采摘方式已无法满足高效率、低成本的生产需求，迫切需要采用智能化控制技术解决生产中用工量最大的采摘问题。本文首先以香菇机械化采摘为例，分析了成熟待采香菇物理特性与层架式生长环境特性对图像识别、机器视觉及柔性机械臂的要求；阐述了香菇采摘、平菇采摘、双孢蘑菇采摘及黑木耳采摘等主要食用菌品种在目标识别、路径规划、采摘方式和机器作业空间等方面的不同，强调了不同品种在采摘方面对复杂操作系统的独特需求。最后，总结现有食用菌采摘技术在识别、减损及效率等方面的局限性，提出未来菇类采摘机器人的发展方向。本文为菇类采摘机器人技术的发展提供了参考，助力我国食用菌产业全链条智能化生产。

关键词：食用菌；采摘机器人；图像识别；机器视觉；综述
中图分类号：S225.9；S611.4　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S1-0001-08

Current Status and Future Prospects of Mushroom Harvesting Robots

WANG Mingyou[1,2]　WANG Da[1]　SONG Weidong[1]　SUN Yuli[2]　ZHANG Zhenye[1]　ZHAO Xinpei[1]
(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*
2. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016, *China*)

Abstract: China is the world's largest producer and consumer of edible mushrooms. As the scale of China's edible mushroom industry continues to expand, traditional manual harvesting methods have become insufficient to meet the demands for high efficiency and low production costs. There is an urgent need to adopt intelligent control technologies to address the harvesting process, which represents the most labor-intensive segment of production. Taking the mechanized harvesting of shiitake mushrooms as an example to analyze the requirements for image recognition, machine vision, and flexible robotic arms, based on the physical characteristics of mature shiitake mushrooms ready for harvest and the attributes of shelf-based cultivation environments. It elaborated on the differences among major edible mushroom varieties, including shiitake, oyster, button, and black fungus mushrooms in terms of target recognition, path planning, harvesting methods, and robotic operational space, emphasizing the unique demands of different species on complex operational systems during harvesting. Finally, the limitations of existing edible mushroom harvesting technologies regarding recognition accuracy, damage minimization, and operational efficiency were discussed, and future development directions for mushroom harvesting robots were proposed. The research result can provide a valuable reference for the advancement of mushroom harvesting robot technology, thereby supporting the full-chain intelligent production of China's edible mushroom industry.

Key words: mushroom; harvesting robot; image recognition; machine vision; review

0　引言

中国食用菌市场体量大，增长稳健。食用菌年产量占世界总产量的75%以上，其总产值在中国种植业中的排名仅次于粮、油、菜、果，居第5位[1]。目前，中国香菇、黑木耳、平菇、金针菇、杏鲍菇等木腐菌产品产量均居世界第1位，总产量也从1978年占全球产量的5.7%上升到2020年的85%以上。2022年，中国香菇产量为

收稿日期：2024－07－20　修回日期：2024－09－22
基金项目：财政部和农业农村部：国家现代农业产业体系项目(CARS-20)和江苏省科技计划项目-现代农业(SBE2022310033)
作者简介：王明友(1982—)，男，副研究员，主要从事食用菌智能生产装备研究，E-mail: wmyss@126.com

1.296×10^7 t，占全球香菇总产量的98.3%，为全球最大的香菇生产国和消费国。

中国袋式模式下的食用菌生产虽然在基质制备、拌料、装料、灭菌、接种、出菇等环节均实现了机械化作业，但在用工量最大的采摘环节仍存在“无机可用”的现状[2]。食用菌采摘以人工采摘为主，存在效率低、采摘成本大等缺点。机器采摘可以实现持续的工作，相比人工可以大幅提升采摘的速度和效率。当前，中国对食用菌采摘设备的研究相较于发达国家起步较晚，食用菌采摘机器人工作时环境的特殊性复杂性，食用菌形状各异，以及对食用菌采摘精度、成功率、损伤率的要求，使得食用菌采摘设备的研究仍处于实验室研究阶段。本文分析国内外食用菌不同品种采摘要求与研究现状，总结现有食用菌采摘技术在识别、减损及效率等方面的局限性，提出未来菇类采摘机器人发展方向，以期促进中国食用菌行业科技进步和产业发展。

1 香菇生长特性与采摘需求

1.1 香菇生长特性

香菇（学名：*Lentinula edodes*），也称为香蕈或棉菇，菌盖直径5～12 cm，最大可达20 cm，扁球形至稍平展，表面浅褐色，深褐色至深肉桂色，有鳞片，幼时边缘往往有白色至污白色状或絮状鳞片。香菇适宜在温暖、潮湿、通风良好的环境中生长，通常在含有丰富营养物质的木屑、稻草、玉米芯等有机基质上生长。最适生长温度为22～28°C，相对湿度为85%～90%。香菇菌棒是一种常见的栽培方式，通常直径为20 cm，长度为40 cm。香菇的生长周期包括菌丝培养、子实体形成和生长3个阶段。菌丝培养阶段需要较长时间，通常为60～90 d；子实体形成和生长阶段较短，一般为20～30 d。香菇子实体包括菌盖和菌柄。菌盖直径通常为5～15 cm，菌柄较短且粗壮，颜色为棕褐色至深棕色[3-4]。

1.2 机械采摘需求

机械采摘需具备准确识别、定位香菇位置和成熟度的能力，以确保只采摘成熟的香菇。香菇子实体较为脆弱，机械采摘时需要控制采摘力度，避免对香菇造成损伤；同时，采摘应能适应不同大小和形状的香菇。由于香菇在菌棒上生长密集，机械采摘设备应具备柔性操作能力，能够在狭小空间内灵活工作，避免对周围未成熟香菇造成影响。在采摘过程中应尽量减少机械采摘设备对菇体及其生长基质的损伤，以确保产品质量和后续生长的顺利进行。为提高采摘效率，机械采摘设备应具备高自动化程度，包括自动识别、定位、采摘和输送功能，减少人工干预。

2 菇类采摘机器人发展现状

菇类采摘机器人是应用于农业领域的自动化技术，目的是提高采摘效率和减少劳动力需求。随着人工智能和机器学习技术的进步，这些机器人在识别成熟水平、定位和精准采摘方面已显著提高。尽管存在成本高、对不同环境适应性需进一步提升等挑战，但采摘机器人已在果蔬特定作物的收获中被越来越广泛地使用。目前，许多菇类采摘机器人还停留在实验室阶段，随着技术的不断改进和成本的逐渐降低，预计未来菇类采摘机器人的应用将进一步扩大。

HUANG等[5]设计了一款蘑菇采摘机器人，主要研究了蘑菇采摘机器人的设计和动态特性。其设计了一个真空杯，如图1所示（其中，F_{bend}为弯曲力，F_{lift}为提升力），作为采摘末端执行器，它被手动定位并与目标蘑菇紧密接触，通过改变真空杯的角度和位置，实现了对蘑菇的采摘；设计了一个机械视觉系统，用于准确地将真空杯定位到目标蘑菇上。在设计中，考虑多种因素，如为避免对蘑菇盖造成伤害，测试中使用的力相对较小。对于紧密聚集在一起的蘑菇，可能需要施加大的力来提高成功率。总的来说，该设计使用真空杯作为采摘末端执行器，如图2所示，通过改变其角度和位置实现对蘑菇的采摘；同时考虑多种因素，如力的控制、真空杯材料的选择等，以提高采摘效率并减少对蘑菇的伤害。

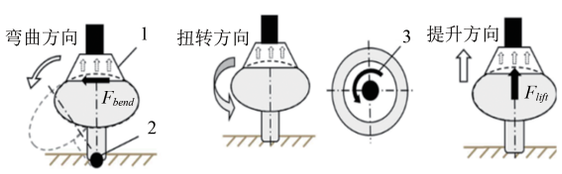


图1 使用弯曲、扭转和提升的动作来采摘蘑菇

Fig. 1 Picking mushroom using motion of bending, twisting and lifting

1. 吸盘 2. 旋转中心 3. 扭矩

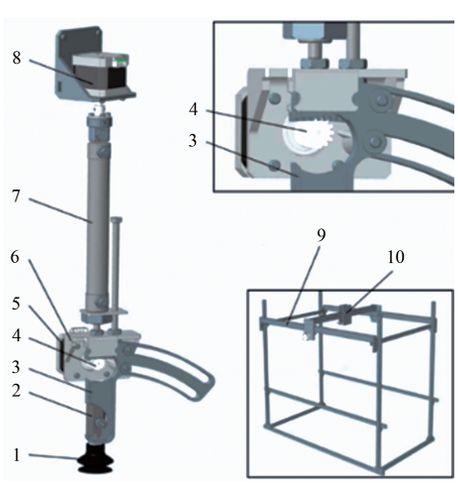


图2 采摘末端执行器的三维模型

Fig. 2 3D model of picking end-effector

1. 波纹管真空吸盘 2. 直通式喷射器 3. 弧形导轨 4. 外齿轮 5、8. 步进电机 6. 连接板 7. 气动缸 9. 精密定位系统 10. 可移动平台

RONG等[6]设计了一款针对大棚的平菇采摘机器人，如图3所示，该机器人能够实现整个温室采摘操作，其关键组件包括感知模块和末端执行器。通过采用

Intel RealSense D435i型相机收集实时的RGB图像和点云图像，并提出了一种改进的SSD算法来检测蘑菇，最后利用现有的软抓手抓取蘑菇。为了提高采摘效率，在移动平台上并联连接4个采摘单元，这4个采摘单元同时工作，可有效地提高机器人整体采摘效率，如图4所示。通过实地实验，证明所提出的机器人系统的可行性和稳健性，为在温室环境中进行大规模、高效的蘑菇采摘提供了一种有效的解决方案。采摘机器人目前只能在一个温室中工作，不能自动切换到另一个温室。这限制了其在不同温室之间的应用和效率。软夹具缺乏力反馈，可能导致成功收获的蘑菇受损。为解决此问题，新的末端执行器应配备力反馈传感器，以便根据不同大小的蘑菇施加适当的力，而不是完全夹住蘑菇使其受损。此外，力反馈传感器还可以反馈成功采摘蘑菇的信号。

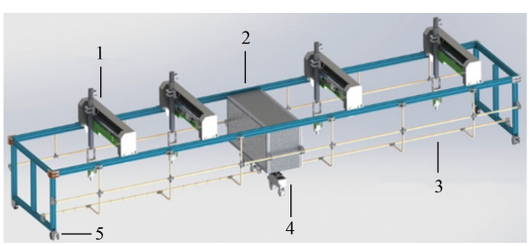
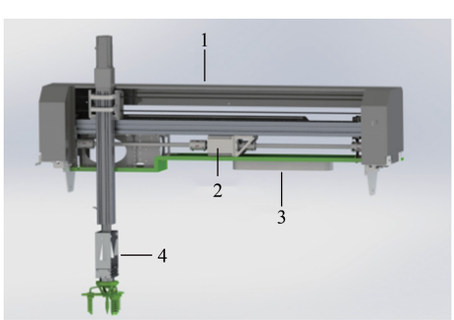


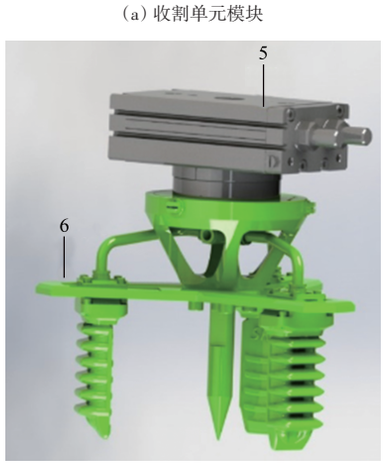
图3　收割机器人的移动平台

Fig. 3　Mobile platform of proposed harvesting robot

1. 收获单元　2. 控制单元　3. 储物篮放置区域　4. 驱动轮　5. 从动轮



(a) 收割单元模块



(b) 抓取蘑菇的柔性手

图4　收割单元的三维视图

Fig. 4　3D views of harvesting unit

1. 横梁　2. 步进电机　3. RGB-D相机　4. 末端执行器　5. 旋转气缸　6. 软夹持器

YANG等[7]设计了一种基于真空负压采摘的平菇新型采摘末端执行器，如图5、6所示。提出了一种具有灵活末端执行器的采摘机器人，以解决以下问题：①避免末端执行器接触蘑菇时的伤害。②在不增加损伤率的情况下提高采摘效率。在工厂环境中该新型蘑菇采摘机器人采摘成功率为88.2%，损伤率为2.9%。

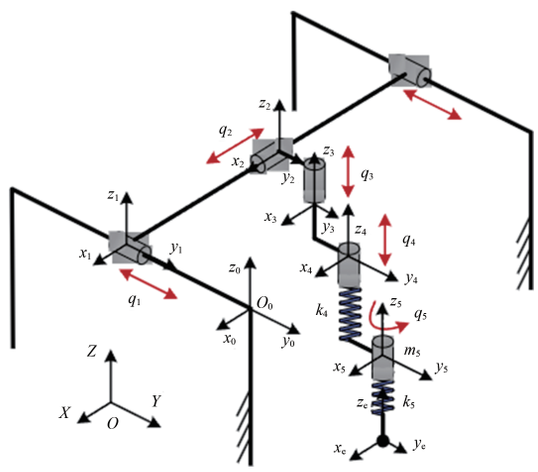


图5　收割机器人的运动方案和参考框架

Fig. 5　Kinematic scheme and reference frames of harvesting robot

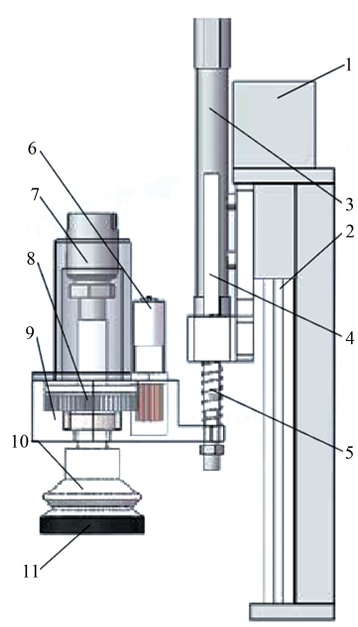


图6　机械结构示意图

Fig. 6　Schematic of mechanical structure

1. 电机　2. 导丝杆　3. 笔式气缸　4. 滑块　5. 弹簧　6. 微型电机　7. 管接头　8. 减速齿轮箱　9. 吸盘底座　10. 柔性吸盘　11. 垫圈

易山林[8]针对双孢菇工厂化种植中的自动采摘问题，设计了一种适用于狭小空间的自动采摘系统，如图7所示，包括移动采摘平台和辅助换层模块的机械结构以及整机运动控制系统。提出了一种粘连菇群分割识别算法，解决大面积粘连双孢菇的识别问题。在实验室模拟环境下进行了整机测试，该算法识别准确率达95.7%，单幅图像处理时间为705.7 ms，满足实时性要求，移动采摘平台采摘成功率为93.32%，单个双孢菇平均采摘用时

为7.76 s;辅助换层模块换层平均用时99.6 s。系统在不同的实验条件下表现出较高的稳定性和适应性。同时在机械结构方面针对菇床层间距离狭小的特点,设计了适应该环境的移动采摘平台和辅助换层模块,并设计了移动采摘平台和辅助换层模块的控制程序,实现了双孢菇的自动化采摘和层间切换。但换层机构体型庞大,存在动力浪费的问题,不利于不同床架间的切换。现有的采摘路径规划不够优化,存在行进较多无效路径的问题,影响采摘效率。在背景复杂的图像中,算法需要更多时间进行背景过滤,影响检测速度。

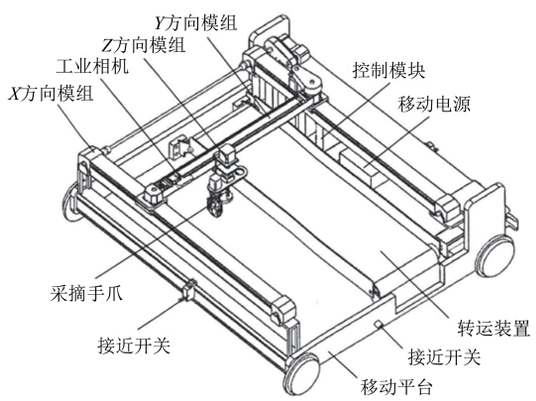


图7 移动采摘平台三维设计图

Fig. 7 Three-dimensional design diagram of mobile picking platform

WANG等[9]提出了一种全新的蘑菇机械化批量收获方法。通过分析手工采摘过程中的动作和力度,设计了一种批量采摘机器人(Batch harvesting picker, BHP),如图8所示。该机器人集成推进机构、导向机构和采摘机构,能够在不损伤香菇的前提下,实现高效的批量采摘,如图9所示。实验结果显示,该批量采摘机器人采摘成功率高达98.93%,采摘损伤率为3.31%,单个香菇棒平均采摘时间为9.8 s,较手工采摘提高2.2~6.6倍的效率。通过对采摘过程的模拟和实际测试,评估了不同采摘环节的效果和效率。分析表明,机器人设计能有效适应香菇生长和成熟特性,大幅度提高了采摘效率,且对香菇损伤极小。

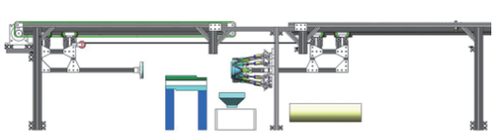


图8 香菇收割机的结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of BHP for shiitake mushroom

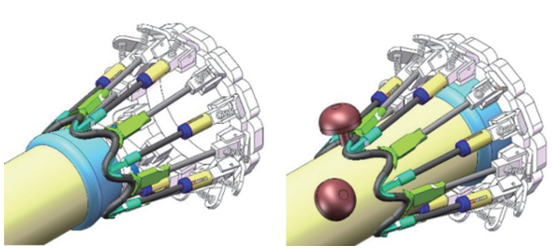


图9 收割执行器工作流程

Fig. 9 Workflow of the harvesting actuator

此设计的缺点主要在于采摘环的设计直接影响了蘑菇采摘损伤。当采摘环靠近茎部时,如果采摘环的厚度过大,会导致力点位置较高,可能会导致蘑菇弯曲较大;如果材料过硬,会对蘑菇产生过多的局部应力,可能导致损伤;如果采摘环的厚度过小或材料过软,可能导致采摘环被压缩到极限,无法产生足够的力量来采摘蘑菇,这将导致由于蘑菇茎和采摘环支撑之间的直接接触而对茎表面造成损伤。

中国农业科学院农业信息研究所研发出一款用于工厂化香菇种植的香菇采摘机器人[10],解决了现有香菇采摘机器人采摘效率低、容易损伤香菇及其生长介质(菌棒)、自动化程度不高以及无法精确识别成熟香菇等问题。该专利提出了一种结合移动平台、升降装置、菌棒拿取装置和香菇采摘装置机器人系统,如图10所示。系统通过3个深度相机采集菌棒的图像数据,并运用多视角目标匹配技术,结合机器视觉和深度学习算法,对香菇的成熟度进行识别和质量分级,实现精准的分级采摘。机器人能够自动地从菌架中取出菌棒,通过升降装置在不同层间移动,并精确地采摘成熟香菇,同时将未成熟的香菇留在菌棒上继续生长,显著提高了采摘自动化水平和效率,减少了对香菇及菌棒的损伤。此外,该系统还能通过智能分析,对香菇进行分类,优化整个采摘流程。

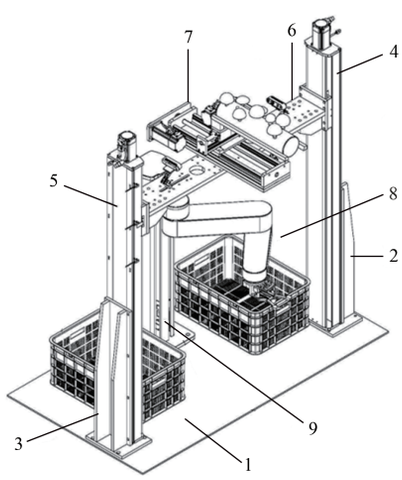


图10 工厂香菇采摘机器人的轴测图

Fig. 10 Isometric view of factory mushroom picking robot

1. 底盘 2. 第一固定板 3. 第二固定板 4. 第一电动缸 5. 第二电动缸 6. 支撑板 7. 菌棒拿取装置 8. 香菇采摘装置 9. 升降机构

农业农村部南京农业机械化研究所发明一种香菇采摘装置[11],此装置主要由行走车、支撑架、采摘机构和导料机构组成。这种装置的优势在于能够自动调整采摘组件的位置,适应不同高度的种植架,无需人工弯腰或登高,大幅减轻了劳动者的体力负担。同时,通过真空吸引方式采摘香菇,避免了物理接触对香菇造成的损伤,保证了采摘品质。整个过程实现了高效、自动化的香菇采摘,显著提高了种植效益。

WANG等[12]深入探讨了黑木耳在采收季节的物理

和机械特性，包括其分离力、泊松比、张力、弹性模量等关键参数，以便为机械化收割和加工设备的开发提供理论依据和数据支持。研究结果不仅揭示了张力角度对分离力的显著影响，还通过高速摄影和图像处理技术成功测定了黑木耳叶片的多个力学性质，为黑木耳的进一步机械化采摘奠定了基础。WANG 等[13]专注于黑木耳收割机的关键操作参数优化和实验研究。通过采用二次正交旋转组合设计和响应面分析方法，对黑木耳收割设备速度、刀频和刀距这 3 个关键参数进行了优化和测试。研究结果表明，优化后参数配置能显著提高生产率、合格率，并降低破损率，其中最优参数组合为托盘速度 308.17 r/min，收割刀频率 10.78 Hz，收割刀间距 84.67 mm。在这组参数下，生产率可达 363 袋/h，合格率为 94.26%，破损率仅为 2.40%。研究提供了一种科学且有效的方法框架，用于系统地分析和优化黑木耳收割机操作参数，不仅提高了收割效率，还确保了产品质量和降低了损伤率。

CONG 等[14]提出了一种名为 Mushroom you only look once（MYOLO）的轻量级香菇检测模型（图 11）。该模型基于 YOLO v3 并经过优化，以提高在复杂生长环境中的检测精度和实时性。通过采用 GhostNet16 替代 DarkNet53 作为骨干网络，引入空间金字塔池化（SPP）实现多尺度特征融合，并设计 shuffle 自适应空间特征金字塔网络（ASA-FPN）以改善密集遮挡下的检测精度，MYOLO 模型在香菇检测任务中平均精度均值达到 97.03%，参数量为 2.98×10^7，平均单幅图像处理时间为 19.78 ms，MYOLO 模型在复杂环境下鲜香菇检测中具有高精度和实时性，适用于香菇采摘机器人。

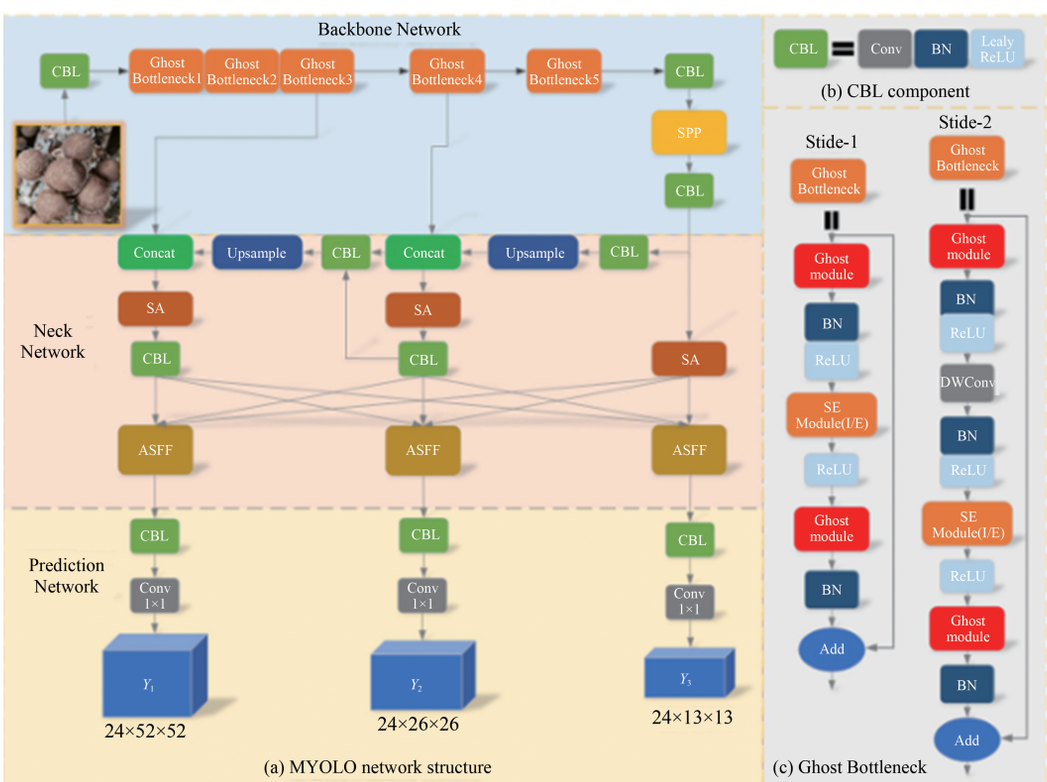


图 11　MYOLO 网络结构示意图

Fig. 11　MYOLO network structure

杨林等[15]提出了一种基于改进的 YOLO v5 模型来识别香菇生育期的方法。首先对 YOLO v5 的模型进行优化，替换上采样模块，并添加针对小目标的检测层，提高了香菇生育期特征提取能力和小香菇识别能力。通过实验，改进的 YOLO v5 模型显示出较好的性能，平均帧率达到 45.25 f/s，平均精度均值为 92.70%，相较于原始 YOLO v5 模型，平均精度均值提升 2.5 个百分点。

此研究能够有效提高香菇生育期识别准确度和速度，满足实时监测需要。此外，使用改进的模型能够减少在自动化采摘中成熟香菇的误检和漏检问题，这对于提高采摘效率和减少劳动成本具有重要意义。然而，改进的模型由于添加了小目标检测层，导致平均帧率有所下降，这可能会影响到其在实际应用中的响应速度。总体来说，该研究通过技术创新提升了香菇生育期识别的效果，对智能农业和精准栽培的发展具有一定的推动作用，尤其是在食用菌自动化生产中。不过，需要进一步优化模型以平衡识别精度和处理速度，以适应不同的生产需求。

ZAKERI 等[16]提出了一个名为 M18K 的全面的 RGB-D 数据集和用于蘑菇检测与实例分割的基准测试，为自动化蘑菇采摘、生长监测和质量控制提供了一个专用的检测数据集。该数据集包含由英特尔

RealSense D405型相机拍摄的423对RGB-D图像，涵盖超过18 000个蘑菇实例。数据集的详细注释和现实生长环境场景为智能蘑菇农业中的检测和实例分割算法提供了标准。该数据集提供了大量具有代表性的蘑菇图像和深度信息，反映了现实世界中的复杂场景，如不同生长阶段的蘑菇和多样的光照条件，对实际应用中的蘑菇检测算法具有高度的适应性。有助于提升算法准确性和鲁棒性。通过GitHub公开图像、代码和训练模型，促进了研究的可复现性和算法的进一步改进，为智能蘑菇农业研究提供了宝贵的数据资源和基准，有助于推动自动化蘑菇采摘系统发展，提高蘑菇种植效率和可持续性。数据集设立了新的行业标准，能够更有效地开发和评估蘑菇检测技术。

3 关键技术分析

3.1 图像识别与机器视觉

3.1.1 菇体识别和定位图像处理算法

菇类自动采摘依赖于高精度图像识别和定位技术。常用的图像处理算法包括颜色空间变换、边缘检测、形态学操作等。近年来，基于深度学习的算法，如卷积神经网络（CNN）和YOLO，在菇类识别中表现出了极高的准确性[17-18]。

3.1.2 机器视觉系统设计与实现

机器视觉系统通常由摄像头、光源、图像处理单元和控制器组成。高分辨率RGB摄像头和深度摄像头（如Intel RealSense D435i型）常用于采集实时图像和点云数据。光源选择需考虑菇体的生长环境和表面特征，避免光反射和阴影对识别效果的影响。图像处理单元利用深度学习模型实时处理图像数据，并输出菇体的位置信息。控制器则根据图像处理单元的输出指令，控制机械臂和末端执行器进行精准采摘[19-21]。

3.2 机械臂与末端执行器

3.2.1 适用于菇体采摘机械臂设计

机械臂设计需满足菇体生长环境复杂性和操作灵活性。常用的机械臂类型包括串联式机械臂和并联式机械臂。机械臂应具备多自由度，以实现灵活的运动控制，适应不同生长位置的香菇。为了提高采摘效率，可以采用多臂协同工作模式，通过并联连接多个采摘单元同时进行操作[22-23]。

3.2.2 末端执行器类型与工作原理

末端执行器是机械臂直接接触菇体的部分，其设计直接影响采摘效果和香菇完好率。常见的末端执行器类型包括真空吸盘、柔性夹具和剪刀式夹具等[24-25]。

（1）真空吸盘：利用负压吸附原理，将菇体吸附后采摘，需要控制吸附力，避免对菇体盖造成损伤。但仅适用于表面较光滑的菇体。

（2）柔性夹具：采用柔软材料制成的夹具，通过夹紧菇体茎部实现采摘，适用于不同尺寸和形状的菇体。需要结合力反馈传感器，以确保适当的夹紧力，减少损伤率。

（3）剪刀式夹具：类似于人手的采摘动作，通过剪切菇体茎部实现采摘。适用于茎部较粗的菇体，但需注意剪切力的控制，以免损伤菇体或菌棒。

3.3 控制系统与算法

3.3.1 运动控制与路径规划

运动控制系统负责机械臂和末端执行器的精准运动，确保菇体采摘的成功率。常用的运动控制方法包括PID控制、模糊控制和自适应控制等。路径规划算法则根据香菇的位置信息，规划最优的采摘路径，减少无效运动，提高采摘效率。常见路径规划算法包括A*算法、Dijkstra算法和RRT（快速探索随机树）算法等[26-27]。

3.3.2 采摘策略与优化算法

采摘策略包括菇体成熟度判定、采摘顺序安排和多臂协同工作策略等。优化算法则用于在采摘过程中动态调整策略，以应对复杂多变的环境。例如，可以利用强化学习算法，通过大量采摘训练逐步优化采摘策略，提高机器人在不同环境下的适应性和采摘成功率。

4 讨论

4.1 菇类采摘机器人与其他采摘机器人对比

菇类采摘机器人与其他农业采摘机器人在技术上有许多相似之处，但也存在一些关键的不同点。无论是菇类采摘机器人还是水果、蔬菜采摘机器人，都需要图像识别技术来确定目标的位置和成熟度，然后控制机械臂和末端执行器，能够在不同环境中灵活操作；均采用智能控制系统和路径规划算法，实现高效、精准的采摘动作，最大化工作效率和最小化损伤率。菇类采摘机器人需处理较为柔软且容易损伤的菇体，采摘时需要特别小心，以避免对菇体和菌棒造成损伤。菇类通常在较为复杂的环境中生长，如多层架式放置的菌棒，需要机器人具备较强的环境适应能力。而其他农业采摘机器人多在开放的田地或温室中作业，环境相对简单。根据不同菌种的栽培方式，菇体生长特点等不同，不同菌种实现机械采摘方式也有很大差异。

4.2 不同菇类采摘机器人技术对比

如表1所示，不同的菇类采摘机器人由于栽培方式和菇体的不同，往往选择的采摘方式和末端执行器都有所不同，通过对比不同类型菇类采摘机器人的技术，可以更好地理解其优劣势，为菇类采摘机器人的优化提供参考。香菇采摘机器人针对性强，能够适应香菇复杂的生长环境，减少人工成本，但技术尚处于实验阶段，采摘成功率和损伤率仍有提升空间。相比与其他食用菌（如双孢蘑菇）的机械采摘，香菇机械采摘有显著区别[28]。

4.2.1 目标采摘要求

香菇采摘主要集中在其圆柱周面的子实体，这与双孢蘑菇的平面采摘方式有显著区别。香菇的子实体通

表1　食用菌种植模式和分布特点

Tab. 1　Edible mushroom cultivation patterns and distribution characteristics

菌种	栽培模式	目标分布
香菇	袋栽培、层架式	菌棒侧面多点出菇
双孢蘑菇	床架式	均匀散生，大小均一
平菇	袋栽培、码垛式	菌袋侧面的开口处簇生出菇，呈层状分布
金针菇	瓶栽培、袋栽培	高密度直立生长，细长密集
杏鲍菇	瓶栽培、袋栽培	培养基顶端单生或少量簇生，垂直向上生长
木耳	袋栽培、段木栽培	侧面多点生长，层叠分布

常沿着菌棒的周面生长，采摘时需要设备能够灵活地环绕菌棒进行操作。相反，双孢蘑菇通常生长在平面的覆土基质上，采摘设备只需在水平面上进行简单的上下移动即可完成采摘任务。

4.2.2　目标识别

香菇与菌棒在颜色上相对接近，特别是转色后的褐色菌棒与香菇的颜色差异较小，这增加了目标识别的难度。视觉识别系统需要更加精准的算法和高分辨率的摄像头来区分香菇与菌棒，以确保准确识别和定位。而成熟的白色双孢蘑菇与黑色的覆土基质之间有明显色差，这使得识别相对容易，视觉系统能够更轻松地检测和定位成熟的蘑菇。

4.2.3　采摘方式

香菇采摘过程需要复杂操作，包括拧、剪、切等动作，这需要设备具备大扭矩和拉力，以便成功地从菌棒上分离子实体。相对而言，双孢蘑菇采摘方式较为简单，只需通过拉拔作用将蘑菇从基质中拔出即可。因此，香菇采摘设备需要更复杂的机械结构和更强大的操作能力，而双孢蘑菇采摘设备则可以采用较为简单的设计。

4.2.4　机器作业空间

香菇生长位置和方式决定了其采摘设备需要更高的灵活性和协调性。为了实现有效采摘，香菇机械采摘设备通常需要双臂机械手臂配合，以实现360°旋转式采摘。这种设计可以确保在菌棒周围的任何位置都能够准确采摘到香菇。而双孢蘑菇的采摘则主要是静态操作，设备只需在平面上移动即可完成采摘任务，操作空间相对简单。

香菇与双孢蘑菇在采摘要求、目标识别、采摘方式和机器作业空间方面存在显著差异。香菇的采摘需要更复杂的识别和操作系统，以应对其颜色差异小、需要多种操作方式以及更复杂的生长环境。而双孢蘑菇采摘相对简单，识别容易，操作方式单一，设备设计也较为简单。这些差异决定了香菇机械采摘设备需要具备更高的技术水平和操作灵活性，以满足其独特的采摘需求。

5　展望

目前，菇类采摘机器人在结构方面多采用串联机械臂和多自由度的末端执行器以适应不规则和密集的菇类生长环境。然而，这些复杂的机械系统往往造价高昂，而且对环境变化的适应性较差。现有机型在湿度高和光照变化大的环境中操作效率下降，维护成本上升，而且对于不同种类菇类的适应能力有限。在视觉算法方面目前广泛采用基于深度学习的图像识别技术，这些技术能够有效识别菇类大小、形状和成熟度。在多样化光照条件和复杂背景下，识别系统的准确性仍面临挑战，尤其是在识别颜色与背景相近的香菇时易发生错误识别。在路径规划方面，利用路径规划算法和机械臂协作策略来优化采摘路径和提高采摘效率。然而，这些策略在复杂环境中的实际应用效果有限，尤其是在高密度种植场景下。未来菇类采摘机器人的发展方向：

(1)结构优化

未来研究应着重于降低机械臂和末端执行器成本，同时提高其对不同环境(如温湿度变化)适应性。探索轻量化材料和模块化设计，以简化维护和提升操作灵活性。

(2)视觉算法

针对特定的采摘环境和菇类特征的同时，结合多种传感器数据(如RGB图像、红外和深度数据)，提高系统在复杂环境下的识别准确性和鲁棒性。利用机器学习技术，如迁移学习和增强学习，优化算法泛化能力和实时性能。

(3)智能控制系统

未来智能控制系统可采用更先进的人工智能算法，如强化学习和自适应控制，以实现更高效的采摘策略和路径规划。控制系统将具备自学习和自适应能力，能够根据不同的生长环境和采摘要求，动态调整采摘策略，提高采摘效率和成功率。

(4)多机械臂协同工作

未来菇类采摘系统可引入多机械臂协同工作模式，通过多个机械臂协同合作，进一步提高采摘效率和覆盖范围。多机械臂系统将通过网络通信和协同控制，实现信息共享和任务分配，确保整个采摘过程的协调与高效。

参　考　文　献

[1]　曹斌，张月吟，高博. 全球香菇产业发展历史、现状及趋势[J]. 食用菌学报，2024，31(3)：1－20.
CAO Bin，ZHANG Yueyin，GAO Bo. Development history，current situation and trends of global *Lentinula edodes* industry [J]. Acta Edulis Fungi，2024，31(3)：1－20.(in Chinese)

[2]　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.

[3]　张梦纳. 香菇种植技术[J]. 河南农业，2023(34)：21.

[4] 鲁鸿卫,马回真.临夏州大棚香菇栽培技术[J].农业科技与信息,2022(16):16-18.

[5] 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: 106145.

[6] RONG J, WANG P, YANG Q, et al. A field-tested harvesting robot for oyster mushroom in greenhouse [J]. Agronomy, 2021, 11(6):1210.

[7] 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.

[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 systems for industrial planting of *Agaricus bisporus* [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023. (in Chinese)

[9] 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(2):108593.

[10] 中国农业科学院农业信息研究所. 工厂香菇采摘机器人及基于视觉的分级采摘方法:CN202410089130.0[P]. 2024-03-15.

[11] 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.

[12] WANG S, SONG W, WANG M, et al. Tests and analyses on physical and mechanical properties of fresh black fungus in picking season [J]. PloS One, 2022, 17(10): 0275565.

[13] WANG M, WANG S, ZHOU D, et al. Optimization and experiment on key parameters of harvester for *Auricularia auricula* [J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1778.

[14] CONG P, FENG H, LV K, et al. MYOLO: a lightweight fresh *shiitake mushroom* detection model based on YOLOv3 [J]. Agriculture, 2023, 13(2):392.

[15] 杨林,曾大鑫,边银丙,等.改进YOLOv5的香菇子实体生育期识别方法[J].农业工程学报,2024,40(9):182-189.
YANG Lin, ZENG Daxin, BIAN Yinbing, et al. Recognizing fruiting body growth period of *Lentinus edodes* using improved YOLOv5 [J]. Transactions of the CASE, 2024,40(9):182-189.(in Chinese)

[16] ZAKERI A, FAWAKHERJI M, KANG J, et al. M18K: a comprehensive RGB-D dataset and benchmark for mushroom detection and instance segmentation [J]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2024 (7):11275.

[17] 曹景军. 基于深度学习的双孢菇采摘机器人视觉系统研究[D]. 北京:中国农业科学院,2021.
CAO Jingjun. Research on computer vision system of *Agaricus bisporus* harvesting robot based on deep learning [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)

[18] 肖扬,周军.图像边缘检测综述[J].计算机工程与应用,2023,59(5):40-54.
XIAO Yang, ZHOU Jun. Overview of image edge detection [J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(5): 40-54. (in Chinese)

[19] 刘茗洋,崔凯,宫金良,等.基于图像融合的不同成熟阶段苹果果实识别[J].华南农业大学学报,2024,45(2):293-303.
LIU Mingyang, CUI Kai, GONG Jinliang, et al. Apple fruit recognition at different maturity stages based on image fusion [J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(2): 293-303. (in Chinese)

[20] 张海宽. 面向苹果采摘和分级的机器视觉系统研究[D]. 沈阳:东北大学,2021.
ZHANG Haikuan. Research on machine vision system for apple picking and grading [D]. Shenyang: Northeastern University, 2021. (in Chinese)

[21] 金之帆. 苹果采摘机械臂轨迹跟踪研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023.
JIN Zhifan. Research on trajectory tracking of apple picking manipulator [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese)

[22] 张伟涛,赵栋杰,王禄,等.一种柔性采摘机械臂的运动学分析与仿真[J].工程设计学报,2024,31(2):230-237.
ZHANG Weitao, ZHAO Dongjie, WANG Lu, et al. Kinematics analysis and simulation of a flexible picking robot arm [J]. Journal of Engineering Design, 2024, 31(2): 230-237. (in Chinese)

[23] 丁媛媛,金寅德.采摘机器人柔性末端执行器抓取策略研究[J].制造业自动化,2013(24):19-22.

[24] 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)

[25] 牛明建. 基于多目标优化的串联机械臂轨迹规划方法研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2023.
NIN Mingjian. Research on trajectory planning method of manipulator based on multi-objective optimization [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023. (in Chinese)

[26] 荀一,李道政,王勇,等.基于VS-IRRT算法的采摘机械臂路径规划[J].农业机械学报,2023,54(2):129-138.
XUN Yi, LI Daozheng, WANG Yong, et al. Motion planning of harvesting manipulator based on VS-IRRT algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 129-138. (in Chinese)

[27] 刘超敏.基于机器学习的采摘机器人控制系统研究[J].农机化研究,2024,46(9):253-256,263.
LIU Chaomin. Research on control system of picking robot based on machine learning [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(9): 253-256, 263. (in Chinese)

[28] 戴飞,杨杰,赵武云,等.双孢蘑菇工厂化生产关键配套装置设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(6):43-51.