

张 华, 朱婷倩, 张运来, 等. 设施番茄精准授粉机器人研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(6): 798-808.

ZHANG Hua, ZHU Tingqian, ZHANG Yunlai, et al. Research progress on precision pollination robots for facility tomatoes[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(6): 798-808.

## 设施番茄精准授粉机器人研究进展

张 华, 朱婷倩, 张运来, 刘苏杭

(安徽科技学院 机械工程学院, 安徽 凤阳 233100)

**摘 要:**随着农业现代化理念的不断推广, 中国设施农业栽植面积在不断扩大, 已居世界前列。番茄作为设施农业中重要的经济作物之一, 及时、高效、细致地对番茄花授粉是促使优质番茄生长的关键。目前设施番茄主要通过人工进行授粉作业, 劳动力占比大、投入成本高。随着机器学习、机器视觉、互联网等技术的快速发展, 授粉机器人将成为代替人力劳作、提高生产效率的关键技术。为全面、深入地解设施番茄精准授粉机器人的发展现状及未来趋势, 对国内外授粉机器人的发展应用情况进行概述, 对设施番茄花朵的目标识别、检测等关键技术进行分析, 概况了番茄授粉末端执行器的种类及结构, 总结了目前采摘末端执行器研究中出现的问题并提出解决方案, 并对液态喷雾式授粉末端执行器的发展及实用性做了分析讨论。最后对现今设施番茄授粉机器人末端执行器发展所遇到的共性问题做了分析和展望。

**关键词:**授粉机器人; 末端执行器; 设施番茄; 目标检测

中图分类号: S224.3

文章编号: 1000-1700(2024)06-0798-11

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research Progress on Precision Pollination Robots for Facility Tomatoes

ZHANG Hua, ZHU Tingqian, ZHANG Yunlai, LIU Suhang

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Fengyang Anhui 233100, China)

**Abstract:** With the continuous promotion of the concept of agricultural modernization, the area of facility agriculture in China is constantly expanding, and it has ranked among the top in the world. Tomato is one of the important cash crops in facility agriculture, and timely, efficient and meticulous pollination of tomato flowers is the key to promote the growth of high-quality tomatoes. At present, the pollination of tomatoes in the facility is mainly carried out by hand, which accounts for a large proportion of labor and has high input costs. With the rapid development of machine learning, machine vision, the Internet and other technologies, pollination robots will become a key technology to replace human labor and improve production efficiency. In order to have a comprehensive and in-depth understanding of the development status and future trend of tomato precision pollination robots in facilities, this paper summarizes the development and application of pollination robots, analyzes the key technologies such as target recognition and detection of tomato flowers in facilities, summarizes the types and structures of tomato powder end effectors, summarizes the problems in the current research on picking end effectors and proposes solutions, and analyzes and discusses the development and practicability of liquid spray powder end effectors. Finally, the common problems encountered in the development of tomato pollination robot end effectors in current facilities are analyzed and prospected.

收稿日期: 2024-01-20

基金项目: 安徽省科技特派员农业物质技术装备领域揭榜挂帅项目(2022296906020001); 安徽省自然科学基金重大项目(KJ2021ZD0110); 2022年度合工大智能院“科技成果培育专项”(IMIPY2022019)

第一作者: 张 华(1978-), 男, 博士, 教授, 从事智能农机装备研究, E-mail: chinafeihong@163.com

**Key words:** pollination robot; end effectors; facility tomato; object detection

近年来,我国设施农业快速发展,设施蔬菜的种植面积在不断扩大,我国温室和大棚等大型设施占世界设施农业生产面积的85%以上,番茄是我国设施栽培的主要经济作物之一,也是全世界种植面积和消费量居前的一种蔬菜<sup>[1]</sup>。近年来我国番茄生产栽培面积一直处于稳中有升态势。据统计,2020年我国番茄种植面积为110.4万 $\text{hm}^2$ ,同比增长1.6%。2021年我国番茄种植面积约为111.3万 $\text{hm}^2$ ,同比增长0.77%。

番茄种植水平逐步提高,通过采用大棚、日光温室等设施可以促进番茄早熟,同时提高番茄的品质和质量,这种栽培方式比露天栽培经济效益更高。设施大棚对植物的生长发育环境进行整体或局部范围的改善,具有保温、抗风、采光好、可周年生产等特点,是目前番茄生产最普遍的种植环境。番茄在其生长发育过程中,授粉是一个重要的环节,通过授粉,可使番茄果实的内部结构更加均匀,有效地提高番茄的坐果率和果实品质,使植株在同样的生长条件下获得更多的果实。

番茄属于自花授粉植物,它的同一朵花上既有雄蕊也有雌蕊,在自然环境下主要通过风吹动或者蜜蜂进行授粉,但由于大棚环境封闭,遮阳网、棚膜等的使用,造成设施内种植的番茄植株与外界隔离,阻碍了虫媒和风媒授粉,导致番茄植株不能及时授粉,授粉不良严重影响了番茄坐果率,进而影响番茄的产量和品质<sup>[2]</sup>。随着设施番茄种植面积的不断扩大,以及农村劳动力的不足、人口老龄化等问题的出现,授粉机器人应运而生,可以有效增加番茄的生产效率,利用科技发展提高授粉效率,推动设施内授粉操作的高效化、自动化、智能化,有效减少授粉工作量,提高番茄的产量和品质。

为全面、深入地了解国内外设施番茄授粉机器人的发展现状及未来发展趋势,本研究对国内外设施番茄授粉机器人精准授粉技术进行阐述和分析,对比目前存在的授粉机器人末端执行器种类,指出设施番茄精准授粉机器人存在的问题及解决方法,以期对相关设施番茄从业者提供参考,促进和推动我国设施农业智能化发展。

## 1 目标花朵识别与检测方法

设施番茄授粉机器人的首要任务是对番茄花朵进行识别,由于设施番茄光照环境复杂、植株形态多样,且其花朵具有花朵小、数量繁多、花朵重叠、排列不规律、姿态朝向各异等特点,番茄花朵的目标识别与检测成为授粉机器人研究的重点和难点,其准确性关系到机器人工作效率<sup>[3]</sup>。图1为设施番茄的生长环境,设施番茄花朵姿态各异,花朵之间相互遮挡重叠,生长环境复杂,这些因素给作业机器人视觉识别系统快速精确识别番茄花朵带来了一定的困难<sup>[4-7]</sup>。因此,对设施环境下的番茄花朵精确识别是番茄授粉机器人目前亟需解决的一个关键问题。



图1 设施番茄生长环境

Figure 1 Facility tomato growing environment

### 1.1 传统目标检测方法

早期的花朵检测方法多为传统的观察分析方法,如DAS等<sup>[8]</sup>主要依靠花朵的颜色进行识别。将花朵区域通过分割算法从图片中分离出来,并将分离出来的花朵的颜色按照其花朵颜色和在图片中占据的比例来进行定义,然后通过颜色名称来查询专门的数据库进而识别花朵。但是仅依靠花朵颜色这一单一因素进行检测,识别成功率较低,因为许多花都具有相似的颜色。因此,在检测识别时除了关注花朵的颜色还需考虑花朵的大小、形状、特征等额外的信息。

JASON等<sup>[9]</sup>运用远程算法和近距离算法相结合的方式,在远程算法识别中主要运用深度相机远程识别目标作物,用分类器粗分割识别到的颜色,并将可能是花的区域从图像中分离出来,再用迁移学习的方式判断在此区域中是否存在花朵目标。近距离的花朵识别则运用RGB-D相机以及实时密集

SLAM对植株进行重构,再用分类算法对重构的植株图像中的花朵进行识别,但此种目标检测方法的识别率并不高。

HONG等<sup>[10]</sup>提出了一种花朵自动识别系统,该系统主要使用基于颜色以及边缘的轮廓检测来检测图像中的花朵轮廓,然后利用K均值聚类和历史匹配信息对其颜色组和轮廓形状进行分类。最终通过对100种花朵的500幅图像进行识别,获得94.8%的成功率。

传统的目标检测方法主要采用分割识别的方式,但由于番茄植株处于复杂的设施环境中,受背景噪声、曝光,以及番茄花朵自身特点的限制,只通过花朵颜色、花朵轮廓的特征进行目标识别导致识别精度较低。

## 1.2 基于深度学习的目标检测方法

近几年来,随着深度学习技术以及硬件设备能力的不断发展,以深度学习为基础的目标检测技术正广泛应用于农业信息化领域,其主要通过卷积神经网络对图片进行特征提取,以获取更高级别特征,进而检测出图片中的目标对象<sup>[11-12]</sup>。对于番茄花朵的识别,使用含有多层堆叠结构的卷积神经网络对花朵的几个主要外形特征进行识别并进行深度学习的方法最为广泛<sup>[13-14]</sup>。

OPPENHEIM等<sup>[15]</sup>采用图像分析算法完成温室环境下的番茄花朵的检测,在温室环境中借助无人机技术在光照条件不均匀、生长条件复杂、花朵大小不同的条件下近距离识别全开期的番茄花朵,实现对温室内黄花番茄花朵的检测和计数,但并未解决同一束番茄花卉具有不同花期的问题。TING等<sup>[16]</sup>提出了一种可以用于番茄花朵检测中的补偿方法,从光学相机的角度出发解决识别模型的光照变化问题,即针对太阳光波动的鲁棒颜色和亮度补偿方法,在改变光照变量这一因素的前提下采用扫描策略,使相机的参数能随着色差和摄像机性能关系进行自适应,以获得番茄花朵花色的最佳色彩校正效果,该方法虽然满足不同光照条件下自动识别花朵的要求,但并没有增加模型训练的鲁棒性。TIAN等<sup>[17]</sup>在花卉检测和识别中运用了SSD深度学习技术,打破了大多数花卉图像只能被识别而无法检测到及只能用于具有单个目标的场景的现状,以牛津大学发表的花卉数据集为研究对象进行训练和测试。但其识别准确率和时间效率上有待提高。LIN等<sup>[18]</sup>使用R-CNN、Fast R-CNN和Faster R-CNN 3种基于区域深度卷积神经网络的目标检测方法分别对草莓花朵进行检测。3种网络模型分别在400张草莓花图片上进行训练,并在100张草莓花图片上进行了测试。最终R-CNN、Fast R-CNN和Faster R-CNN在测试集上的准确率分别为63.4%、76.7%和86.1%,平均每张图片的检测时间分别为7 226, 2 709, 118 ms。杨其晟等<sup>[19]</sup>将YOLOv5算法进行改进,可以识别和检测在复杂的环境条件下4种状态的苹果花朵,该方法对跨阶段局部网络模块局部改进和数量调整,结合协同注意力模块设计主干网络,提高模型检测性能并减少参数。解决了现有目标检测算法难以实现复杂环境下对苹果花朵状态的精准识别的难题。林君宇等<sup>[20]</sup>提出的花卉及其病害特征识别采用多输入卷积神经网络模型,可有效的提高训练速度,通过迁移学习的方法来实现对模型进行分类。对花卉的病症识别准确率达到88.2%,该方法只能识别近距离大目标花卉,并不能解决设施环境下番茄花朵的识别问题。

传统的卷积神经网络通常不能同时对花束区域和花期信息进行同时提取,识别精度不高,通常采用单一的方式,针对这个问题,赵春江等<sup>[21]</sup>研究可面对整个花束区域进行识别和提取的番茄授粉机器人,识别出全开期、花蕾期、初果期和谢花期,并对各花期花朵进行精准识别。提出一种将两级神经网络级联的方法,既能实现花束区域的提取,也能实现对花期的精准识别,计算出全开期花朵在该花束中的占比,为番茄授粉机器人的精准作业探索一种新的识别方法。

余贤海等<sup>[22]</sup>基于YOLOv5s算法,提出一种改进的TFCD-NET算法用于番茄花朵的目标检测,在对花束区域提取和对花期精准识别的基础上,增加了花朵姿态朝向的识别算法,检测出番茄的3种花期与5种姿态朝向。将TFDC-NET算法移植到自主研发的授粉机器人控制系统中,通过TFDC-NET算法完成对番茄花朵的目标检测、花期分类和姿态识别,对处在全开期并且姿态为前的花朵目标进行定位,并控制机械臂完成授粉作业。

基于深度学习的目标检测方法通过卷积神经网络对图片进行特征提取,对算法进行不断改进和叠加,以及对研究对象的不断训练和测试,逐渐解决了复杂条件下对番茄花朵的识别问题、同一束番

茄花卉具有不同花期问题及目标识别精度低问题。目前,针对于设施番茄授粉最先进的目标检测算法既能提取出番茄花束区域,又能识别出番茄花朵的不同花期与姿态朝向,对全开期且姿态向前的花束进行优先授粉。相比于传统的目标检测方法,基于深度学习的目标检测方式对算法进行了改进,并对图像进行预处理,获得了更高级别的番茄花朵特征,识别效率和精度大幅提高。

## 2 设施番茄授粉机器人末端执行器分类及介绍

目前对于设施番茄的授粉方式主要有熊蜂授粉、植物生长激素授粉、振荡授粉3种(图2、图3和图4)。根据授粉的需要,末端执行器需要完成喷雾、蘸取、振动等动作。授粉环节的设计不仅要末端执行器结构进行设计,同时还针对作业对象的生长环境,协调深度相机与末端执行器的位置<sup>[23-25]</sup>。

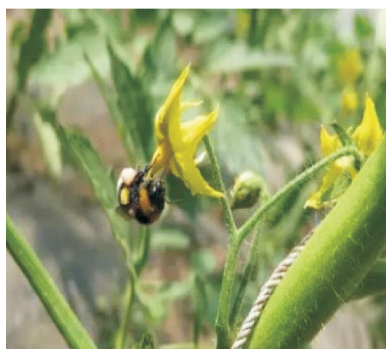


图2 熊蜂授粉

Figure 2 Bumblebee pollination



图3 植物生长激素授粉

Figure 3 Plant growth hormone pollination



图4 振荡授粉

Figure 4 Shock pollination

近年来,移动机器人技术发展迅速,已经应用到设施农业环节的各个领域,发展智能机器人是提升农业自动化水平的必经之路<sup>[26-27]</sup>。随着授粉机器人的发展,研究人员正在不断改进和创新末端执行器的设计,以提高授粉机器人的效率和可靠性。目前,末端执行器的研究趋向于智能化、精准化和多样化。这些末端执行器通常与机器人的控制系统和视觉系统相结合,以实现精确的授粉操作<sup>[28-29]</sup>。现今所采用的设施番茄授粉的末端执行器结构主要有喷气式、振动式、接触蘸取式等物理方式,以及模拟熊蜂授粉的生物方式、喷施植物生长调节剂等化学方式。

番茄植株具有雄蕊和雌蕊在同一花朵上的特点,花朵上面凸起的部分是它的雄蕊,它的雌蕊被雄蕊包裹着。本部分对以上5种设施番茄授粉机器人末端执行器结构进行了阐述,表1为各类末端执行器优缺点对比。

### 2.1 喷气式

北京市农林科学院智能装备技术研究中心研发了一种自适应间歇喷气引起花朵震动的智能番茄授粉机器人<sup>[30]</sup>。主要由移动底盘、AUBO i5六轴协同机械臂、末端执行器几部分构成的智能番茄授粉机器人(图5)。喷气导致花朵震动以达到模拟人工振荡授粉的效果,喷气授粉的工作范围为番茄花束区域。能够对花束进行模拟自然风,进行“间接喷气”授粉操作。但由于设施内的环境复杂,结构光相机受天气和光线影响,其定位精度有待提高。

### 2.2 模拟熊蜂飞行授粉

以色列初创公司 Arugga 研发出一种 AI 驱动的授粉机器人(图6),可代替熊蜂对番茄进行授粉。机器人沿着两排植株之间的轨道前行,捕捉每朵花的图像,然后运行 AI 算法,便可立即确定它们是否准备好授粉。然后向它们发射空气脉冲,通过振动促进番茄完成授粉。从番茄的授粉方式来看熊蜂授粉的成本较高,对使用农药存在较多限制<sup>[31-32]</sup>。熊蜂授粉户农民以 20~40 岁为主,年龄较大的种植户接受新技术能力迟缓。

### 2.3 振荡式

振动棒是一种常见的末端执行器,它模拟蜜蜂的振动行为来释放花粉。振动棒可以在花朵上快

表1 设施番茄授粉机器人末端执行器结构

Table 1 End effector structure of tomato pollination robot in facility

末端执行器结构 End effector structure	原理 Principle	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
喷气式 Jet-propelled	通过对番茄花朵间歇喷气导致震动,模拟人工振荡授粉 Artificial shock pollination is simulated by intermittent air blow among tomato flowers	节约资源、环保 Resource conservation and environmental protection	授粉不均匀、授粉成功率受花粉活性影响较大 The pollination was uneven and the pollination success rate was greatly affected by pollen activity
模拟熊蜂飞行授粉 Simulate bumblebee flight pollination	向要授粉的番茄植株发射空气脉冲,通过振动促进番茄完成授粉 Pulsed air are emitted to the tomato plants to be pollinated, and the tomatoes are vibrated to complete pollination	节约劳动力、环保 Labor saving, environmental protection	成本较高 The cost is higher
振荡式 Oscillating type	将振动针放置在番茄植株中,通过高频振动促使雌蕊的花粉飘落到雄蕊柱头上 A vibrating needle is placed in the tomato plant, and high-frequency vibrations induce pollen from the pistil to fall onto the stigma of the stamens	利用自身花粉完成授粉、作业范围大 The pollination is completed by using its own pollen, and the operation range is large	授粉不均匀、对植株具有一定伤害 Pollination is uneven and harmful to plants
喷雾式 Spray type	通过向番茄植株喷施植物生长调节剂,促进番茄授粉 Promoting tomato pollination by spraying plant growth regulators onto tomato plants	授粉效率高、同时提高番茄果实品质 It has high pollination efficiency and improves the quality of tomato fruits	劳动力强度大、作业不精确容易造成环境污染和作物伤害 Labor intensity and inaccurate operation can easily cause environmental pollution and crop damage
接触蘸取式 Contact dip type	将蘸取番茄花粉的末端对准番茄全开期的花朵进行授粉 Align the end of the dipped tomato pollen with the fully blooming flowers of the tomato for pollination	操作简单 Simple operation	作业时间长、效率较低 Longer operation time and lower efficiency

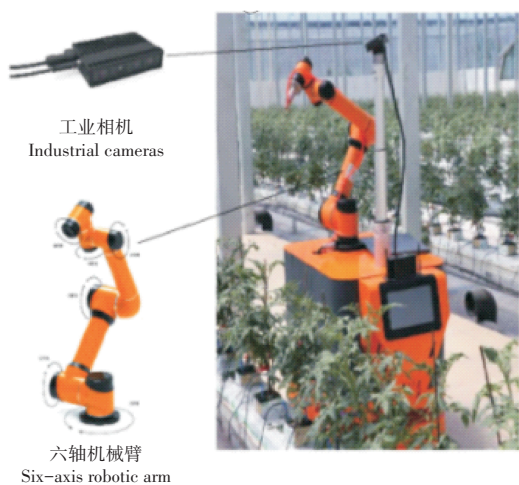


图5 自适应间歇喷气智能番茄授粉机器人  
Figure 5 Adaptive intermittent air blowing intelligent tomato pollination robot



图6 AI驱动的授粉机器人  
Figure 6 AI driving pollination robot

速振动,使花粉从花蕊中脱落(图7),并落在其他植株的花蕊。通过使用电动授粉器顶端的高频振动,促使雌蕊的花粉自然飘落到花柱上达到授粉目的。可以多次重复授粉,坐果率高,不会产生药害,同时也可以节省大量人工。但是在高温或者低温条件下,花粉自身活力降低,导致授粉困难。

#### 2.4 喷雾式

喷雾式授粉通常用于一些需要人工辅助授粉的情况,它可以提高植物的授粉效率,确保植物能够成功繁殖。通常将授粉液体装在一个小喷壶内,对准已开放3~4朵花的花序喷施,通过植物激素具有类似生理和生物学效应的物质,在农业生产上使用,达到稳产增产、改善品质、增强作物抗逆性等目的<sup>[33-34]</sup>。但这种授粉方式目前还处于人工喷施阶段。

#### 2.5 接触蘸取式

合肥智能机械研究所2021年研制出一款智能型授粉机器人(图8),主要由智能移动底盘、升降台、六自由度机械臂、用于接触式授粉的末端执行器、深度相机等部件组成,通过ROS系统用于室内环境中各种果蔬花朵的自动化授粉。通过深度相机获得物体三维形态并对花朵进行高精度的三维重建,准确地获得它们在空间中的位置坐标信息,并获取其花期和姿态信息。番茄花朵通过深度相机检测后,机械臂通过接受深度相机反馈回来的空间坐标信息,对花朵进行定位,移动底盘自主移动到目标位置,通过机械臂和末端执行器对花朵进行接触式授粉。



图7 振荡授粉

Figure 7 Shock pollination

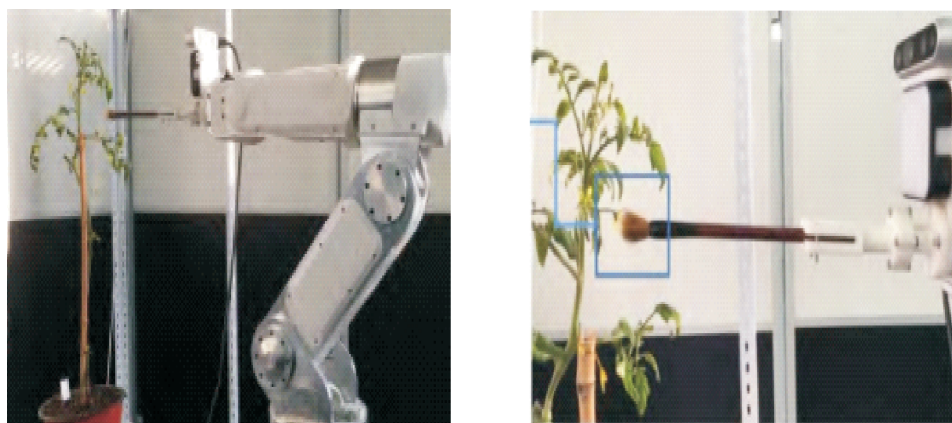


图8 接触蘸取式番茄授粉机器人

Figure 8 Contact dipping tomato pollination robot

### 3 喷雾授粉研究

喷雾装置是利用喷头将液体分裂成雾滴并使其均匀分布在作用对象表面。国内对于番茄授粉机器人的试验研究多采用物理方式,而通过运用植物生长激素液态授粉的方式还处于人工阶段。国内外对于猕猴桃果树授粉的研究较为先进,采用喷干粉或喷雾的方式,对识别出的待授粉猕猴桃花朵进行间歇式喷洒(图9)<sup>[35-36]</sup>。因此将猕猴桃果树授粉的理论及番茄激素授粉方式结合,根据番茄花朵的花束特点以及番茄生长环境进行算法改进,采用喷雾的方式对作物进行间歇式喷洒,是未来设施番茄授粉末端的一个研究方向,对减少农药残留、精准授粉等都具有重要意义<sup>[37]</sup>。

#### 3.1 手动喷雾

手持式喷雾器靠手动增加容器内部压力进行喷雾。用滑石粉将花粉稀释,并将稀释好的花粉送入容器内,人工将花粉粘送到每一朵雌花上。在设施番茄的人工授粉作业中,通常使用一种可以进行连续喷雾的番茄喷花授粉器(图10),通常需要选用适当的喷花药,将其加入授粉器内,然后将喷头对准番茄的花柄或花萼位置,在合适的时间段内进行喷洒操作,以达到授粉的效果。

以上两种授粉方法均需要大量人工参与,由于番茄花朵生长密集、排列不整齐、番茄花朵花期不统一等特点,在人工操作的过程中难免出现遗漏,且受季节性和设施内的环境制约,任务量较大,耗时耗力。

### 3.2 电动喷雾

电动喷花授粉器采用低容量细雾喷洒的方式,可以将花粉或授粉药均匀地喷洒在作物的花朵上,提高授粉效果。大黄蜂授粉枪通过旋钮进行调节出粉量。授粉时通过气吹的方式出粉,喷药均匀,授粉速度快,整机密封性能好,属于低容量细雾喷洒,授粉药利用率高(图11)。



图9 猕猴桃授粉机器人

Figure 9 Kiwifruit pollination robot



图10 喷花授粉器

Figure 10 Flower spray pollinator



图11 电动授粉枪

Figure 11 Electric pollinator

国外对于猕猴桃等果树的授粉采用优先选花和液态授粉的方式,对识别出的待授粉猕猴桃花朵进行间歇式喷洒<sup>[38-40]</sup>。但果蔬授粉机器人结构庞大,并不能直接应用于设施农业环境中,而国内对于喷雾技术已经进行了大量的研究<sup>[41]</sup>,但番茄的液态授粉还处于人工阶段,因此可以将猕猴桃果树授粉的理论及番茄激素授粉方式结合,根据番茄花朵的花束特点以及番茄生长环境进行算法改进,采用喷雾的方式在番茄花柄处进行间歇式喷洒,减少农药残留,既可以起到环保的效果,也可以达到精准授粉的目的。

## 4 目前面临的问题及解决方案

授粉技术是轻简化设施农业发展的重要配套技术之一,国内对于设施番茄授粉机器人的研究较晚,大多数地区仍以人工点授的授粉方式为主,受季节性和设施内环境的制约较多,且劳动力强度大,使设施番茄授粉智能化发展缓慢。目前的研究主要集中在番茄花朵的目标识别与检测,设计的设施番茄末端执行器有接触蘸取式、间歇喷气式、模拟自然风振荡授粉等,研究的设施番茄授粉装置多采用物理方式,且处于试验阶段,并没有投入生产。

### 4.1 目前面临的问题

番茄授粉机器的技术可行性还需要进一步研究和改进,因为番茄的授粉需要精确而敏感的操作,包括正确的花粉传递和成功的授粉过程,这对于机器来说可能是一项挑战。末端执行器作为设施番茄授粉机器人最重要的组成结构,其授粉末端执行器设计不足直接或间接引起以下问题。

4.1.1 授粉准确率不高 目前开发的番茄花朵授粉机器人,大多利用双目视觉系统获取到的彩色图片中番茄花朵的饱和度、色调、颜色特征和大小特征对其进行提取和识别检测,并在立体视觉的基础上获取需要授粉的目标花朵的三维空间坐标。由于设施内复杂的种植环境,导致番茄授粉识别算法的识别率较低,其识别准确率大多在80%以下,执行授粉的整个操作所花费的时间较长,并不能满足农业自动授粉的商业需求。

4.1.2 通用性不强 通用性问题是目前农用机械面临的主要问题之一,现有的设计大多主要针对特定环境进行设计,末端执行器的作业范围有限,不同的植物的授粉机制和特点有所不同,改变作业环境或者作业对象,授粉机器人将无法工作。设施番茄授粉机器人的通用性可能相对较低,但随着技术的进步和研究的深入,未来可能会有更多通用性较强的授粉机器人面世。

4.1.3 授粉精度较低 番茄授粉的精度既包括对番茄待授粉花序的精准识别,也包括对授粉量的控制。目前的番茄喷雾授粉与接触式授粉末端虽然满足了智能授粉的需求,解决同一束番茄植株开花时间不同的问题,但没有保证对授粉用量的精准控制,导致资源浪费。

4.1.4 番茄液态授粉还处于人工阶段 国内对于设施番茄智能化授粉的研究还处于初始阶段,末端执行器结构主要是以喷气式和接触蘸取式为主。番茄液态授粉还采用手持式喷雾器喷施的方式,国内先进的喷雾技术并没有应用到设施番茄授粉作业中。

总体来说,番茄授粉机器人还面临一些技术挑战和实用性问题,需要进一步研究和改进才能更好地适应实际种植环境和需求。

## 4.2 解决方案

通过对喷雾授粉的研究发现,国内对于液体雾化的研究较为完善,雾化效果的检测方法已经比较成熟<sup>[42-43]</sup>。但对于设施番茄授粉机械中喷雾授粉的研究较少,喷雾机械虽然有一定的研究发展,但由于喷雾机械在番茄花朵授粉中面临着结构限制、颗粒大小不匹配、不适宜的喷雾时间等难题,很少应用于番茄液态授粉作业中,尤其是针对设施内种植模式的番茄授粉。

4.2.1 挤压式喷头 图12为挤压式喷头的外部结构,其主要工作原理是通过储药泵将药液吸入到橡胶气囊中,使橡胶气囊内充满药液和压力,通过深度相机识别到待授粉的番茄花序,电机控制电磁阀的开合释放药液,最终将雾化后的液体喷洒到番茄花序上,完成设施番茄的间歇式液态授粉,其内部结构如图13。同时根据其工作原理设计了漫喷洒番茄授粉机器人结构(图14)。

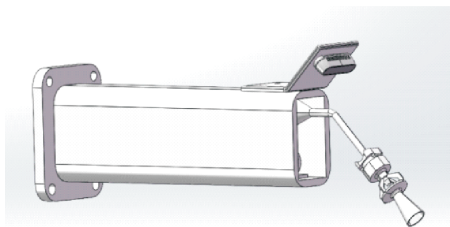
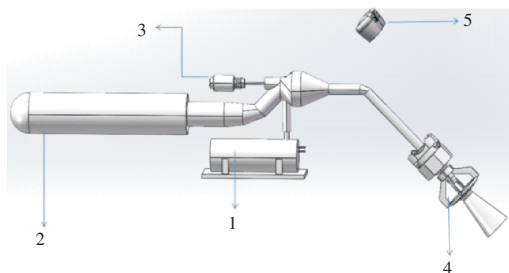


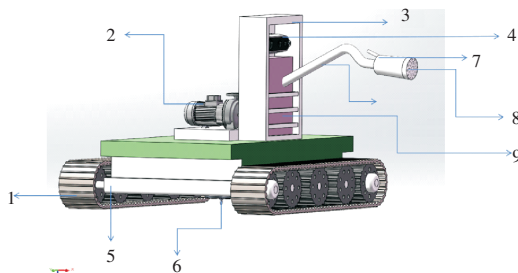
图12 挤压式喷头的外部结构  
Figure 12 External structure of squeeze spray head



1.储药泵;2.橡胶气囊;3.电磁阀;4.雾化喷头;5.双目相机  
1.Storage pump;2.Rubber water bladder;3.Solenoid valve;4.Atomizing nozzle;  
5.Binocular camera

图13 挤压式喷头的内部结构

Figure 13 Internal structure of extrusion nozzle

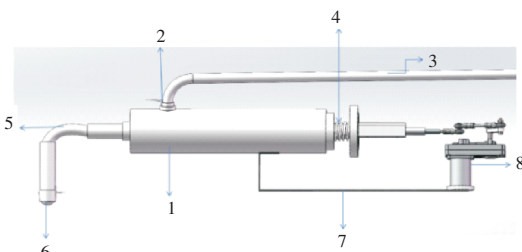
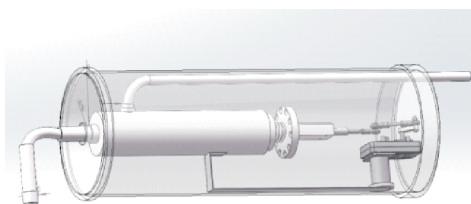


1.履带底盘;2.压力泵;3.支架;4.双目相机;5.车架;6.电机;7.电磁阀;8.喷头;9.橡胶气囊  
1.Crawler chassis;2.Pressure pump;3.Bracket;4.Binocular camera;5.Frame;6.Motor;7.Solenoid valve;8.Nozzle;9.Rubber bladder

图14 漫喷洒番茄授粉机器人

Figure 14 Tomato pollination robot with diffuse spraying

4.5.2 接触式喷头 图15为接触式喷头的外部结构,其内部结构如图16,由壳体、助推管、进料管、导流管、支架、滚珠、电力推杆组成。主要是通过电力推杆带动电推杆完成推拉作用,将进料口中进入的液体经过导流管输送到滚珠上,涂抹到待授粉的番茄植株花序上。



1.壳体;2.进料口;3.进液管;4.助推管;5.导流管;  
6.滚珠;7.支架;8.电力推杆  
1.Shell;2.Feed port;3.Liquid inlet tube;4.Booster tube;5.Elbow tube;6.Ball;  
7.Bracket;8.Power push rod

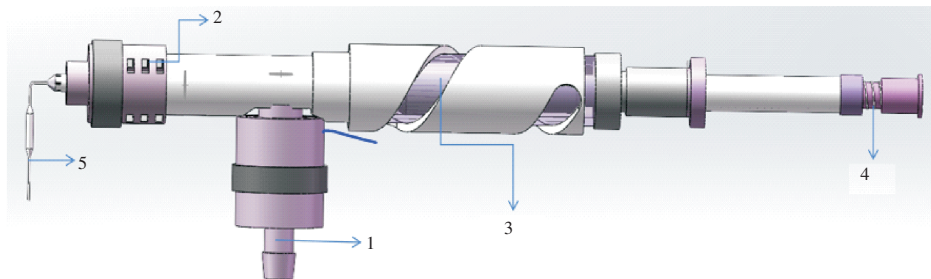
图15 接触式喷头的外部结构

图16 接触式喷头的内部结构

Figure 15 External structure of contact nozzle

Figure 16 Internal structure of contact nozzle

4.5.3 注射式喷头 根据家禽注射器的工作原理,设计了末端执行器结构(图17),通过凸轮电机(图18)带动助推杆将腔管内的液体向前运动,将出液口中的弹簧进行挤压,弹簧中小球(图19)推至喷头口,液体顺着喷头喷出,完成授粉作业后凸轮电机再次转动半周,助推杆弹回,此时腔管内的压强较小,液体由出液口进入补充腔管内的药液。



1.进液口;2.出液口;3.腔管;4.助推杆;5.喷头  
1.Liquid inlet;2.Liquid outlet;3.Cavity tube;4.Booster rod;5.Nozzle

图17 接触式喷头的外部结构

Figure 17 External structure of contact nozzle

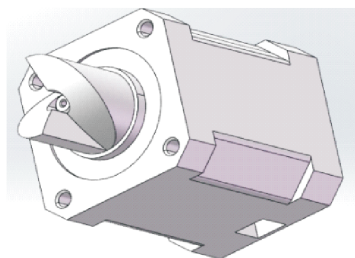


图18 凸轮电机  
Figure 18 Cam motor

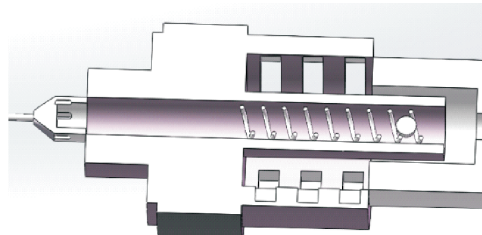


图19 出液口内部结构  
Figure 19 Internal structure of liquid outlet

结合设施番茄植株的特点,建立了番茄植株3DMAX模型(图20),创建番茄植株的授粉应用场景,将设计的挤压式喷头结构搭载在中科深谷四轮驱动移动机器人(图21)底盘以及六轴机械臂上,进行番茄植株的精准授粉(图22)。



图20 番茄植株3DMAX模型

Figure 20 3DMAX model of tomato plants



图21 中科深谷四轮驱动移动机器人

Figure 21 Zhongke Shengu four-wheel drive mobile robot

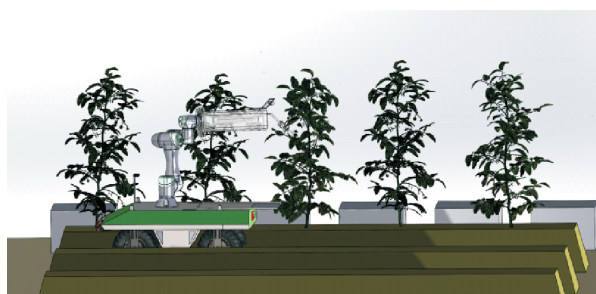


图22 设施番茄授粉应用场景

Figure 22 Application scenarios of tomato pollination in facilities

## 5 结论与展望

番茄花朵具有花朵小、花朵重叠、遮挡、分散密集等特点,在设施环境下对番茄花朵的识别试验还受设施内的光线条件、背景噪声、识别距离等影响。因此在后续的研究过程中要对算法进行不断优化。

由于设施番茄授粉的复杂性,授粉末端执行器的结构、深度相机位置以及末端的电磁阀控制都要进行不断优化,避免授粉过程中对番茄植株的伤害。测算出的番茄授粉用量、底盘运行速度、授粉作业时间等因素调整电磁阀的开合时间并优化末端形状,这些都是末端执行器实用化过程中亟待解决的问题。

### 参考文献:

- [1] 孙艳敏. 设施番茄高产种植与管理技术要点[J]. 农业工程技术,2020,40(8):70.
- [2] 张 磊,刘琪芳,聂红玫,等. 基于改进YOLOV4网络模型的番茄果实检测[J]. 中国农机化学报,2022,43(12):162-169.
- [3] 李 龙,李美芹,尼秀媚,等. 不同授粉方法对番茄坐果和结籽量的影响[J]. 安徽农业科学,2022,50(20):42-44.
- [4] 龙洁花,赵春江,林 森,等. 改进Mask R-CNN的温室环境下不同成熟度番茄果实分割方法[J]. 农业工程学报,2021, 37(18):100-108.
- [5] 伍莹芮,张志勇. 基于图像处理技术的棚室番茄果实识别[J]. 山西农业科学,2021,49(7):898-902.
- [6] 刘 芳,刘玉坤,林 森,等. 基于改进型YOLO的复杂环境下番茄果实快速识别方法[J]. 农业机械学报,2020,51(6): 229-237.
- [7] 王景盛,刘巧英,赵平珊. 日光温室冬春茬番茄振动器授粉效果研究[J]. 蔬菜,2016(4):21-23.
- [8] DAS M,MANMATHA R. Indexing flower patent images using domain knowledge[J]. IEEE Intelligent Systems and their Applications,2002,14(5):24-33.
- [9] OHI N,LASSAK K,WATSON R,et al. Design of an autonomous precision pollination robot[C]//2018 IEEE/RSJ In-

- ternational Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).Madrid,Spain.IEEE,2018:7711-7718.
- [10] HONG S W,CHOI L.Automatic recognition of flowers through color and edge based contour detection[C]//International Conference on Image Processing Theory.IEEE,2013.
- [11] 钱茹雪.基于神经网络的花朵图像识别及分类[J].信息技术与信息化,2022(3):210-213.
- [12] 赵春江,文朝武,林森,等.基于级联卷积神经网络的番茄花期识别检测方法[J].农业工程学报,2020,36(24):143-152.
- [13] 张小锋,刘红铮.基于卷积神经网络的花朵图片分类算法[J].计算机与现代化,2018(9):52-55.
- [14] 李正明,王森,孙俊.图像分割在成熟茄子目标识别中的应用[J].农业机械学报,2009,40(增刊1):105-108,96.
- [15] OPPENHEIM D.Detecting tomato flowers in greenhouses using computer vision[C]//World Academy of Science, Engineering and Technology,2017,11(1):104-109.
- [16] TING Y,KONDO N,WEI L.Sunlight fluctuation compensation for tomato flower detection using web camera[J].Procedia Engineering,2012,29:4343-4347.
- [17] TIAN M,CHEN H,WANG Q.Detection and recognition of flower image based on SSD network in video stream[J].Journal of Physics Conference Series,2019,1237:32-45.
- [18] LIN P,LEE W S,CHEN Y M,et al.A deep-level region-based visual representation architecture for detecting strawberry flowers in an outdoor field[J].Precision Agriculture,2020,21:387-402.
- [19] 杨其晟,李文宽,杨晓峰,等.改进YOLOv5的苹果花生长状态检测方法[J].计算机工程与应用,2022,58(4):237-246.
- [20] 林君宇,李奕萱,郑聪尉,等.应用卷积神经网络识别花卉及其病症[J].小型微型计算机系统,2019,40(6):1330-1335.
- [21] 文朝武.基于三维视觉的番茄授粉机器人手臂引导系统研究[D].上海:上海海洋大学,2021.
- [22] 余贤海,孔德义,谢晓轩,等.基于深度学习的番茄授粉机器人目标识别与检测[J].农业工程学报,2022,38(24):129-137.
- [23] 张俊峰,王志伟,张玉鑫,等.不同授粉方式对日光温室番茄生长及品质的影响[J].安徽农业科学,2017,45(35):50-52.
- [24] 朱明义,林晨曦,何蓓蓓,等.樱桃番茄不同授粉方式试验[J].浙江农业科学,2023,64(4):873-875.
- [25] 曹丽丽,戴宇婷.三种授粉方式在春季设施番茄上的应用评价[J].南方农业,2022,16(11):24-26.
- [26] 孙艳军,徐刚,高文瑞,等.不同授粉方式对日光温室番茄产量、品质及效益的影响[J].中国蔬菜,2017(6):38-41.
- [27] 韩江雪,郭小明,汤永恒,等.基于孪生网络的协作机器人目标追踪[J].辽宁石油化工大学学报,2022,42(6):90-96.
- [28] 温淑慧,问泽藤,刘鑫,等.基于ROS的移动机器人自主建图与路径规划[J].沈阳工业大学学报,2022,44(1):90-94.
- [29] 彭佃亮,刘永光,夏海波,等.不同授粉方式对日光温室草莓产量、品质及效益的影响[J].北方园艺,2016(4):52-55.
- [30] 文朝武,龙洁花,张宇,等.基于3D视觉的番茄授粉花朵定位方法[J].农业机械学报,2022,53(8):320-328.
- [31] 王晓峰,张青,苏爱华.熊蜂授粉技术在温室樱桃番茄的应用效果研究[J].北方园艺,2013(11):45-47.
- [32] 王宏,彭智群,王道泽.熊蜂授粉在蔬菜设施栽培中的优点及应用技术[J].上海蔬菜,2006(5):53.
- [33] 王西锐,李永武,黄仁煌.猕猴桃喷雾授粉技术[J].落叶果树,2010,42(6):45.
- [34] 郭丽霞,张燕玲,蓝福生,等.罗汉果人工喷雾授粉技术研究[J].南方农业,2015,9(28):20-22,36.
- [35] LIU L M,LIU Z Y,HAN H,et al.Influence of different liquid spray pollination parameters on pollen activity of fruit trees—Pear liquid spray pollination as an example[J].Horticulturae,2023,9(3):350.
- [36] 傅英恒.猕猴桃喷雾授粉[J].湖南林业科技,1989,16(3):58.
- [37] 姜妍,王琳,杨月,等.无人机高光谱成像技术在作物生长信息监测中的应用[J].东北农业大学学报,2022,53(3):88-96.
- [38] 吴朝阳,解法旺,陈书法,等.基于大豆冠层状态变化的变量施药系统设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2023,54(1):90-97.
- [39] 肖珂,郝毅,高冠东.果园自动变距精准施药系统设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):137-145.
- [40] 肖涛,程均欢,刘涛,等.不同授粉方式对猕猴桃果实性状的影响[J].中国南方果树,2022,51(3):122-125.
- [41] WILLIAMS H,NEJATI M,HUSSEIN S,et al.Autonomous pollination of individual kiwifruit flowers: Toward a robotic kiwifruit pollinator[J].Journal of Field Robotics,2020,37(2):246-262.
- [42] 秦维彩,陈盼阳.农用无人机喷头类型及其在农业航空中的应用[J].南方农机,2023,54(6):5-8.
- [43] 孟鹏豪,童俊华,周海丽,等.喷雾参数对猕猴桃精量靶授粉雾滴沉积量的影响[J].浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(2):263-271.