

陈玉梅,申允德,张成浩. 黄瓜自动化栽培系统研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):174-180.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.043

黄瓜自动化栽培系统研究进展

陈玉梅¹, 申允德¹, 张成浩²

(1. 温州大学机电工程学院, 浙江温州 325000; 2. 浙江省农业科学院蔬菜研究所, 浙江杭州 310016)

摘要:概述黄瓜自动化栽培系统的研究进展,针对黄瓜播种育苗、移栽定植、搭架引蔓、整枝与采收的农艺规程,介绍国内外黄瓜培育系统、移栽系统、吊落蔓系统、侧枝修剪机器人和采摘机器人的研究现状,分析制约黄瓜采摘机器人应用研究的因素为采摘效率和制造成本,最后指出未来黄瓜自动化栽培系统的研发重点为简化机器人任务和强化机器人性能。

关键词:栽培系统;采摘机器人;侧枝修剪;末端执行器;自动化

中图分类号: S233.74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)05-0174-06

我国作为典型的农业大国,果蔬产业产出一直较大,1978年,我国蔬菜播种面积为333.1万 hm^2 ,2015年扩大到2199.967万 hm^2 ,分别占当年全国农作物总播种面积的2.22%、13.22%;2014年我国蔬菜种植总产量达到76005.48万t,2015年增长到78526.10万t,比2014年增长3.3%。黄瓜种植成本由人工成本、物质服务费用和土地成本构成。人工成本包括家庭用工折价和雇工费用,随着黄瓜种植面积增大,收获就要耗费大量的时间和人力。但随着农村劳动力缺乏,人口老龄化加剧,必须降低采摘成本、提高采摘果实质量、提高劳动生产率、保证果实的适时采收、提高产品的国际竞争力^[1],进而降低设施黄瓜种植成本中的人工成本占比,提高黄瓜种植净利润。

针对上述研究背景,本研究提出的黄瓜农艺规程为播种育苗→移栽定植→搭架引蔓与整枝→采收。为了实现黄瓜种植的以上4个流程,一套完整的黄瓜自动化栽培系统应该包括栽培系统、侧枝修剪机器人和黄瓜采摘机器人。本研究通过分析比较各部分的国内外研究现状,提出黄瓜自动化栽培系统关键部分的发展趋势,并进行总结,旨在为未来开发完整的黄瓜自动化栽培系统提供参考。

1 黄瓜栽培系统国内外研究现状

栽培系统包括培育系统、移栽系统和吊落蔓系统,分别实现黄瓜种植过程中的播种育苗、移栽定植和搭架引蔓过程。

1.1 培育系统

黄瓜种子属于包衣类蔬菜种子,为实现播种育苗环节自动化,须要利用播种机实现自动化育苗。温室育苗用播种机^[2]多为固定型机器人,作业流程为穴盘填土→浇水→播种→覆土→育苗箱搬出。

收稿日期:2017-10-23

基金项目:2017年度浙江省重点研发计划(编号:2017C02018)。

作者简介:陈玉梅(1994—),女,四川泸州人,硕士研究生,主要从事农业机器人及自动化农机装备研究。E-mail: 865705722@qq.com。

通信作者:申允德,博士,高级工程师,副教授,主要从事农业机器人及自动化农机装备研究。E-mail: shenyunde63@163.com。

国外设施育苗配套设施的穴盘育苗播种设备研制较早,目前日本和美国的育苗工厂已大规模开发使用温室机械育苗播种成套设备,流水线自动完成穴盘装土、刮平、压窝、播种、覆土和浇水等多道工序作业。发达国家的蔬菜商品穴盘育苗率约为70%,荷兰某公司生产的岩棉块种苗生产线的播种作业生产率约为14400粒/h^[3]。

目前,我国穴盘育苗播种机有针式、板式和滚筒式,按工作原理分为机械式和气力式。现阶段的穴盘育苗播种机械多以气力式为主,精度不高,推广程度不高^[4]。2017年,青岛农业大学的张峰峰等研制出一种自动蔬菜穴盘育苗精量播种机,对辣椒和南瓜进行试验,平均播种单籽率约为96%,漏播率约为1.4%,多籽率约为2.5%^[5]。

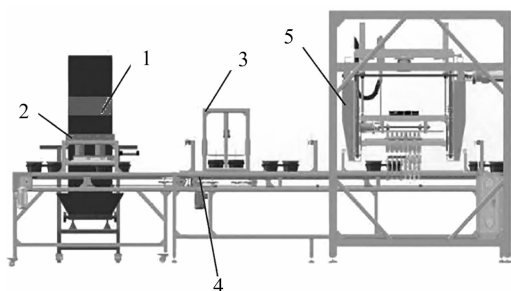
1.2 移栽系统

为了培育出优质黄瓜,必须对瓜苗进行适当的移栽作业,目前移栽机分为全自动型和半自动型2种,作业流程为供苗→取苗→挖坑→栽苗→覆土。2013年,中国农业大学的Jin等研究了蔬菜移栽机中幼苗拾取设备的发展现状,分析比较了国内外拾取机构的优劣势^[6]。国外温室自动移栽机技术已经较为成熟,但其结构复杂、价格昂贵、体积庞大,与我国现阶段设施农业的生产模式适应性较差。

国内对穴盘苗移栽机的研究大多处于研究和试验阶段,移栽装备经历了3个发展阶段:滑道机构、杆机构和回转机构^[7]。2016年,江苏大学的胡建平等研制出了一种八爪温室钵苗移栽机(图1),可实现自动填土、打穴、定位输送、整体间隔取苗、分散间隔投苗、苗盘连续进给,移栽平均合格率约为95%^[8]。他的团队同年又研制出了一种温室穴盘苗移栽机,其末端执行器到达取苗点后,取出幼苗,输送至目标盘放苗点后,释放幼苗并进行栽苗,平均取苗移栽成功率约为90.7%^[9]。

1.3 吊落蔓系统

黄瓜为藤生农作物,贴地生长的黄瓜沾泥,易腐烂、商品性差、产量低。为提高农产品质量,通常采用搭架引蔓方法,但仅适合生长量不大的短季节露地栽培,近年来随着黄瓜品种的改良,单株植株可长达几十米,而竹竿高度有限,植株爬到竹竿顶端仍会再次匍匐在地面,故吊蔓式立体栽培成为温室作物栽培的趋势和潮流。



1—上土机；2—填土装置；3—打穴装置；
4—输送装置；5—移栽装置

图1 温室钵苗移栽机整机结构

国外对果蔬新型栽培模式的研究很多,如草莓高架栽培模式、番茄拉线栽培模式、黄瓜高架线栽培模式,在适应机械化采摘的同时,也达到了高产高效的目的。针对新的种植模式也研发出了相应的自动化栽培系统,如中国农业大学的陈一飞等研发了温室草莓立体栽培智能控制系统,栽培支架在电机的驱动下使栽培槽实现升降和摆动动作,以达到改善采光条件和调控温度层的目的^[10]。日本农业机械学会的 Ota 等研发出了一种自动间距控制的可移动番茄高架栽培系统,根据番茄生长阶段的不同来合理分配架间间距,以达到增加果实产量的目的^[11]。黄瓜的高拉线栽培模式最早源于荷兰,21 世纪初,荷兰农业工程研究所的研究员提出了以拉线种植代替传统黄瓜搭架种植模式,此模式下种植的黄爪瓜藤与拉线缠绕^[12],随着黄瓜生长长度的无限型发展,研究的重点已经逐步转向如何实现拉线收放,即吊落蔓作业是此新模式的关键。现多为人工操作,近年来向机械化发展,韩国目前采用一种可移动的拉线栽培模式,但仍处于半自动形式,未实现垂直落蔓与水平移动的同步作业,仍需要人工辅助。

国内对吊落蔓器的研究还处于起步阶段,2011 年,齐飞等发明了一种温室作物的吊蔓装置,每个植株对应一个吊蔓线组,吊蔓线一端固定在栽培槽中,一端连接至牵引线,由移动装置控制牵引线两端进行水平移动,以完成分枝与主蔓开合动作^[13]。2014 年,农业部规划设计研究院的鲁少尉等提出了一种设施番茄可移动吊蔓装置,通过卷轴带动钢缆简单地实现番茄行距调整^[14]。2015 年,唐山市农业科学研究院的韩靖玲等提出了一种简易温室黄瓜吊落蔓器,利用棘轮棘爪机构实现吊落蔓,依靠人工作业,大规模种植时劳动强度很大^[15]。

2 侧枝修剪机器人国内外现状

黄瓜一般为主蔓蔓结瓜类型,须适时去除侧枝,并及时摘除卷须、雄花及底部的黄叶、病残叶,减少无效养分的消耗,改善通风透光条件,侧枝修剪机器人可以实现此整枝过程。

2.1 国外现状

整枝机械与修剪机器人的研究国外起步较早,主要以经济发达的欧美、日本等地区和国家为代表。20 世纪初,欧美发达国家就已开始用简易的组合机械来完成繁重的草坪修剪工作,当时主要使用的是一些简单的机械式刀剪工具以及使用柴油机和汽油机作为动力来源的小型背负式机械。此后,整枝机械的研究工作得到了突飞猛进的发展^[16]。从 20 世纪 80 年代开始,各种园林培植剪枝专用机械纷纷面世,如剪枝

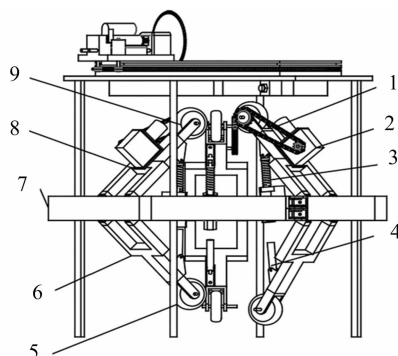
刀、剪枝机、智能剪枝机器人等,树木修枝整枝机械逐步进入快速发展时期,各种机型已经较为齐全。2010 年,英国坎特伯雷(Canterbury)大学和林肯大学联合研发了一款具有夜视功能的葡萄树剪枝机器人^[17]。

2.2 国内现状

目前国内树木整枝修剪机械有手持背负式、车载式和自动式等多种形式。手持背负式整枝机在市面上应用较多,主要分为无动力和有动力 2 种。根据工作装置又分为剪刀式、液压剪式、圆锯片式、往复锯条式和导轨链锯式。车载式整枝机是在较大型拖拉机上侧置液压折叠臂,臂端配有可以往复运动的液压剪,用于修剪大面积树冠、灌木丛或地面杂草,部分设备通过车载自动升降台,将人送往不同高度位置进行人工整枝修剪。

浙江工业大学的杨庆华等发明了一种葡萄树剪枝机器人系统,分析处理葡萄树枝图像信息并提取剪枝点坐标信息后,规划机械臂轨迹^[18]。华南农业大学的吴良军等分析了果树气动修剪机的应用现状发现,气动修剪机在推广使用中存在 3 个问题:(1)修剪时间集中,长期闲置,汽油机易发生故障;(2)气动剪的剪切能力尚不能完全满足使用要求;(3)气动剪的研发集中在气动短剪,对气动高枝剪的研发相对落后^[19]。

Fu 等研制了一种结构稳定的快速爬升剪枝机器人(图 2),3 个爬升臂沿平面间隔 60° 均匀布置,上升速度约 20 mm/s^[20]。同年 11 月,李和良发明了一种茶树修剪机,夹具先将树枝夹住,修剪装置进行修剪,但作为自走装置,对机械臂定位要求很高^[21]。



1—链轮；2—电机；3—弹簧；4—直线驱动器；5—支轮；
6—支撑腿；7—六边形框架；8—驱动腿；9—驱动轮

图2 快速爬升剪枝机器人

2.3 小结

国内外侧枝修剪机器人主要运用在园林领域,用于树木等硬枝条或大面积杂草的修剪,针对柔嫩枝条的侧枝修剪机器人的研究还处于几乎空白状态。

3 黄瓜采摘机器人国内外现状

采收是黄瓜栽培过程的最关键流程,黄瓜采摘机器人通常包括移动机构、机械臂、末端执行器和机器视觉单元、控制系统和驱动单元,黄瓜采摘机器人具有以下特点:

(1)作业对象的非结构性和不确定性。与工业机器人作业对象不同,黄瓜果实生长状况受到品种、土壤、温度、湿度、光照等内外因素的影响,导致黄瓜生长位置具有不确定性,除此之外还有果实重叠、果实被枝叶遮挡等现象,这就要求黄瓜

采摘机器人不仅要具有与生物体柔性相对应的处理功能,而且还要适应瞬时万变的自然环境,在结构环境中对机械臂结构和控制要求很高,因此在视觉、推理和判断等方面具有相当高的人工智能。(2)作业对象的娇嫩性和复杂性。黄瓜果实表面柔嫩,易损伤,为了避免影响储存和销售环节,必须保持黄瓜果实的完整性,这要求黄瓜采摘机器人的末端执行器必须细心轻柔地进行夹持,完成采摘动作。且黄瓜形状呈长圆形或圆柱形,生长发育程度不一,性状存在差异。采摘机器人一般是作业、移动同时进行,行走的路径不是连接起点和终点的直线,而是可以遍及垄间的曲线。(3)良好的通用性和可编程性。由于黄瓜采摘机器人不仅要实现采收作业,还要实现侧枝修剪的功能,它的操作对象包括黄瓜果实和侧枝,具有多样性和可变性,要求采摘机器人具有良好的通用性和可编程性。只要改变部分软、硬件,改变判断基准,改变动作顺序,就能进行多种作业。例如,更换不同的末端执行器就能分别完成侧枝修剪和采收作业。(4)操作对象和价格的特殊性。黄瓜采摘机器人的使用者目前大部分为农民,因此要求机器人必须具有高度可靠性和操作便捷性。另外,黄瓜采摘机器人的研发目的是替代人工作业,以缩减黄瓜收获过程中的人工成本,因此黄瓜采摘机器人制造与使用成本应低于人工成本,以最合理的价格走入市场。

3.1 国外现状

20 世纪 50 年代,开始出现黄瓜采摘机的相关专利^[22-26]。20 世纪 90 年代末,日本的 Arima 等研制出了一种基于黑白摄像机的四轮式黄瓜采摘机器人^[27];荷兰农业环境工程研究所(IMAG)研制出了一种高拉线种植模式下的黄瓜收获机器人,实验室试验结果为 10 s/根^[28]。2002 年,周增产

与荷兰农业环境工程研究所联合研制出 7 自由度机械手,虽然优化了探测时间和采净率,但采摘效率仍然不高^[28]。2003 年,该所 Heten 等改进后的采摘机器人(图 3),可在不同收获位置对单根黄瓜执行多次采摘动作,但由于对果梗定位不准确,并非每次采摘动作都能成功,试验采摘成功率仅为 74.4%,最长实际采摘周期为 124 s^[29]。2006 年,Henten 团队开始对黄瓜采摘机器人进行优化研究,进行动力学分析后提出 PPRR 型 4 自由度机械手^[30]。2007 年,Henten 等对机械手动力学参数进行优化,提出了一种 PPRR 四杆式最优机械手,如图 4 所示^[31]。2008 年,首次提出了 P6R 型 7 自由度机械手^[32]。2010 年,该团队进一步阐述了 P6R 冗余机械手的运动学反解算法,通过在线和离线判断待采摘黄瓜是否处于机器人可行域,确定机械手运动控制的无碰撞采摘姿态。该团队在 2013 年提出了未来果蔬采摘机器人的研发重点包括简化任务、加强机器人、定义要求、测试性能和考虑成功应用后附加功能^[33]。



图3 荷兰农业环境工程研究所研制黄瓜收获机器人采摘试验

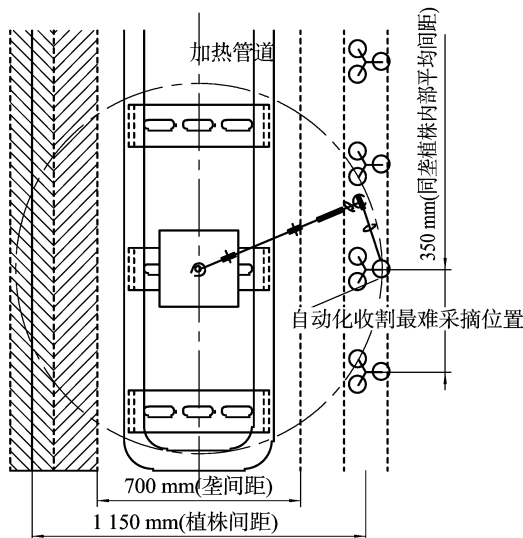
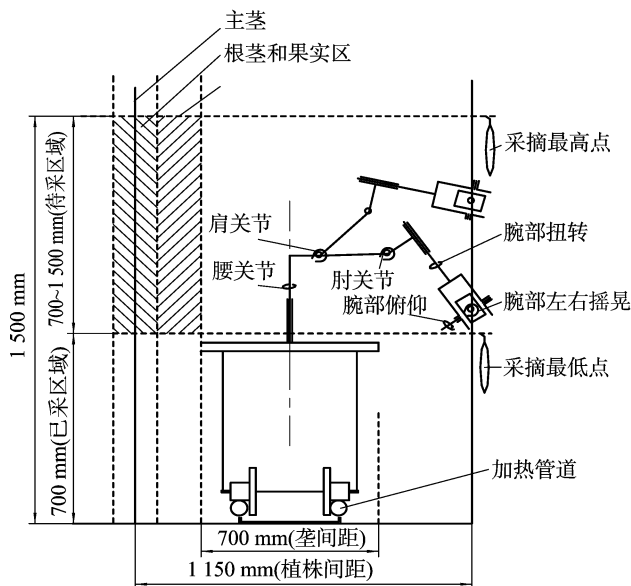


图4 大棚模型与黄瓜植株侧视图(左)和俯视图(右)

3.2 国内现状

目前,我国在智能农业机器人方面的研究还处在起步阶段,投资少,发展比较慢。20 世纪 90 年代中期,我国对采摘机器人的研究也逐渐起步,针对黄瓜采摘领域,研究的切入点比较多,近年来的研究主要围绕机械结构、果实识别和路径规划 3 个方面展开。

3.2.1 机械结构

3.2.1.1 末端执行器 末端执行器为直接接触黄瓜果实的部件,主要目标是实现果实的无损夹持。浙江工业大学的钱少明等研发出了一种黄瓜采摘末端执行器,包括抓持器和切割器,通过对抓持特性进行研究发现,黄瓜无损夹持力约 5 N,果梗切断力约 55 N,最大抓持力约 20 N,采摘时间约

3 s, 采摘成功率约 90% (45/50) [34]。

3.2.1.2 机械臂 机械臂是果蔬采摘的重要执行机构, 它进行采摘的流程包括图像采集定位、机械臂采摘控制、视觉系统判断结果并指导控制系统控制机械手进行作业 [35]。中国农业大学的冯青春等对黄瓜采摘机械臂进行结构优化, 本研究采用的是 5 自由度极坐标式机械手, 利用参数优化法、三次多项式插值法和 Matlab 平台, 建立了机械臂运动 D-H 数学模型, 机械臂采摘范围约占可行域的 90% (图 5) [36]。

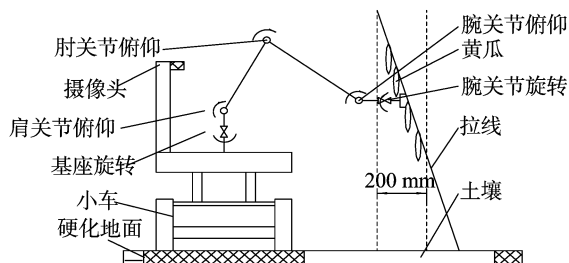


图5 黄瓜采摘机械臂工况

3.2.1.3 整机研究 研究出一套完整的采摘机器人系统, 就可以实现黄瓜的全自动化采收, 近年来国内涌现了许多关于黄瓜采摘的系统性研究。2009 年, 中国农业大学的李伟等发明了一种斜拉线栽培方式下的黄瓜采摘机器人系统, 如图 6 所示 [37]。同年, 中国农业大学的 Tang 等在美国农业生物工程师学会 (ASABE) 2009 年度会议上, 提出了一种斜棚架栽培模式下的黄瓜自动化采摘机器人, 试验测试切断成功率约为 93% (图 7) [38]。

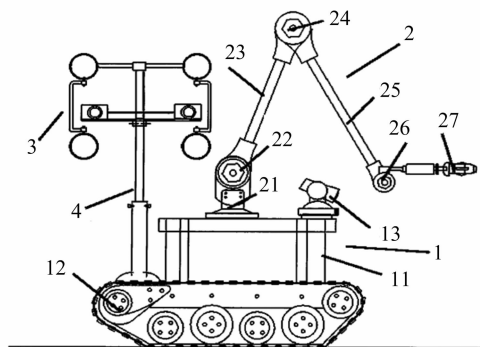


图6 黄瓜采摘机器人系统结构图示

中国农业大学的纪超等研发了一种温室黄瓜采摘机器人 (图 8), 机器人发现目标则停住, 由双目视觉系统、机械臂与末端执行器相继完成果实的定位、抓取和回收动作, 无目标或采摘完成后则保持行走状态, 直至终点, 平均采摘周期为 28.6 s, 采摘成功率为 85% [39]。2013 年, 李伟等发明了一种人机协作式的非完整黄瓜智能收获机, 黄瓜落蔓时将待采果实悬挂在导轨下方的挂钩, 图像处理单元判断黄瓜成熟后发出指令, 由电磁刀具进行收获, 单轨收获完成后由人工换轨 (图 9) [40]。同年, 中国农业大学的杨振宇等设计了一种斜拉线模式下的自导航温室黄瓜收获机器人, 收获过程如图 10 所示, 它通过横向和斜向升降运动实现黄瓜采摘, 试验收获速度约为 25 根/min, 采摘成功率约为 92% [41]。佳木斯大学的葛宜元等研发出了一种黄瓜采摘机器人, 末端执行器手爪上的刀片在机械手爪闭合的同时切断果梗, 随后将黄瓜放入收集

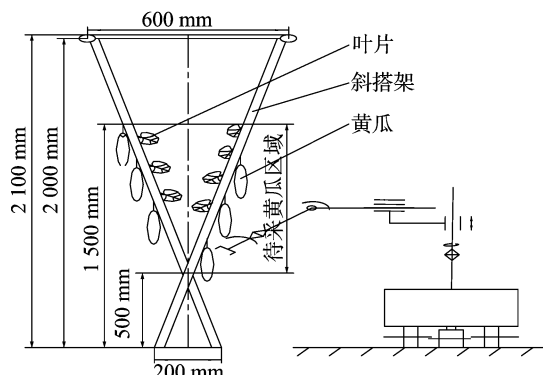
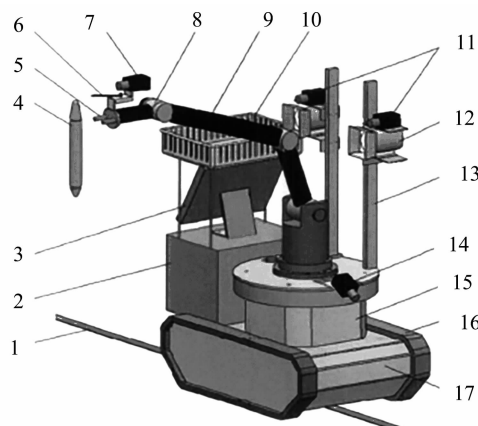


图7 斜搭架模式下黄瓜采摘机器人的机构



1—导航线; 2—能源系统; 3—显示器; 4—黄瓜; 5—手指; 6—切刀; 7—近景定位摄像机; 8—关节; 9—连杆; 10—果实筐; 11—双目支撑架; 12—辅助光源; 13—支撑架; 14—导航摄像头; 15—车载工控机; 16—履带; 17—行走底盘

图8 黄瓜采摘机器人硬件构成

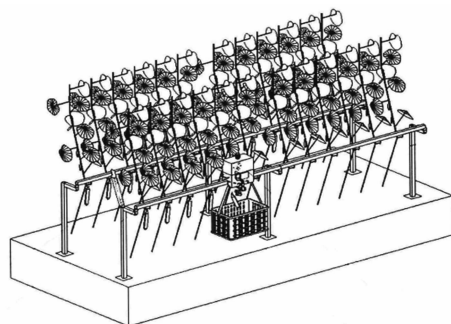


图9 单轨黄瓜收获机立体结构图示

箱 (图 11) [42]。

3.2.2 果实识别 黄瓜生长环境复杂, 果实与枝叶颜色相近, 且形状不规则, 因此如何在复杂的栽培环境下准确识别果实并定位, 是黄瓜采摘机器人的关键技术之一。目前现有的果实识别方法包括基于形状特征、纹理特征、色彩特征、图像分割的分析方法和光谱分析方法, 浙江工业大学的戚利勇提出了 1 种基于形状特征的多模板匹配算法, 试验识别黄瓜成功率约为 87% [43]。天津理工大学的赵相飞结合色彩分析和纹理分析 2 种方法, 以确定黄瓜完整图像 [44]。

3.2.3 路径规划 采摘机械臂的运动轨迹不是连接出发点和目标位置的最短距离, 需要避开瓜叶、瓜藤、未成熟黄瓜等障碍。2010 年, 中国农业大学的汤修映等提出了一种基于机

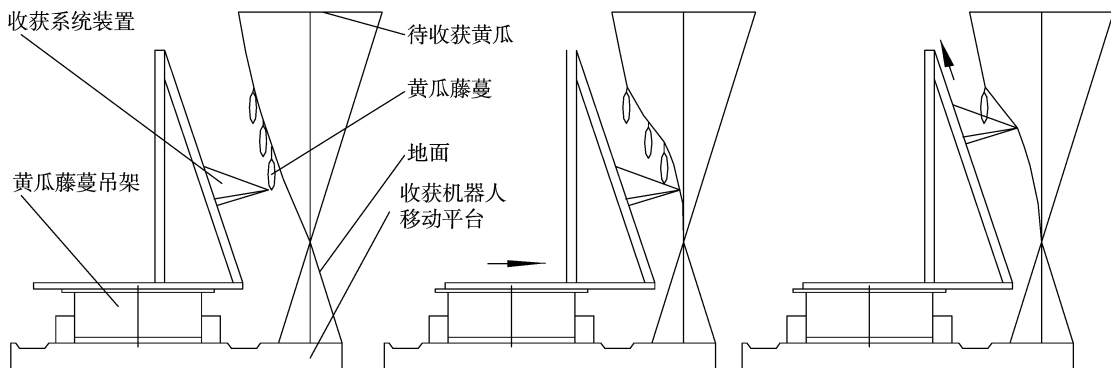


图10 自导航黄瓜收获机器人一次收获过程

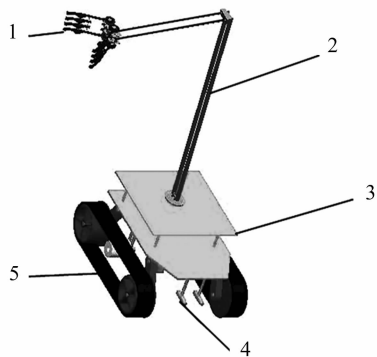


图11 黄瓜采摘机器人机械手结构

器视觉和关节空间的避障轨迹规划法,将未成熟黄瓜按形状分类,提出中间过渡点的概念,对黄瓜采摘机器人运动规划研究方面有一定的参考意义^[45]。

3.3 小结

国外针对黄瓜采摘领域研究起步较早,研究较多的国家为日本和荷兰,其中大量研究来源于荷兰瓦格宁根大学研究中心,主要提出了一种黄瓜斜拉线栽培方式,使果实和茎叶生长时易分开,以适应机械化采摘;国内黄瓜采摘机器人的相关研究多数来源于中国农业大学,主要对黄瓜采摘机器人进行系统性研究,其次是对机械结构进行优化设计,近2年研究重点开始偏向于如何识别和定位黄瓜果实、果梗,进行快速、准确采摘。

4 分析与展望

纵观国内外黄瓜自动化栽培系统各部分的发展现状,黄瓜采摘机器人作为自动化栽培系统最关键的部分,仍然存在以下问题。

4.1 存在的问题

4.1.1 果实的识别率和采摘率不高 机器人的一般采摘流程为行走定位(发现目标)→停住→识别定位(确定采摘点)→切断抓取→回收→行走,以上采摘环节均由机器人自主作业完成,其中任一环节出错,均会影响果实采摘成功率。目前已研发的黄瓜采摘机器人的采摘成功率约为90%,其中采摘失败的现象有误采未成熟黄瓜、误切果实、果梗切断失败、抓取掉落、机械手与根茎发生干涉运动等。

采用视觉传感器进行果实和茎叶识别定位时,可采取颜

色色度法和几何形状特性等方法,如番茄、柑橘、葡萄等在收获时期与背景颜色不同,利用RGB的颜色信号即可进行识别,故可以采用前2种基于果实光谱反射特性的方法,但由于光照、镜面反射等干扰信息影响,识别效果欠佳^[16]。对于与叶子呈同系颜色的黄瓜果实识别,采用RGB颜色比较方法较为困难,故可以采用形状定位方式,但由于果实重叠、枝叶遮挡,无法保证目标果实全部具有完整边界条件,很难直接区别出果实的具体形状,自2010年以来,黄瓜开始普遍采用斜搭架模式栽培,斜拉线模式可以在一定程度上增加黄瓜果实曝光率。综上所述,果实识别均须要进行灰度值临域分析,这个过程很耗时,因此往往无法满足重复、快速的预处理要求。

4.1.2 果实的平均采摘周期较长 黄瓜整枝和采收作业过程复杂,耗时耗力,这要求侧枝修剪和采摘机器人减轻人工劳动强度,同时保证与人工采收同等甚至更高的采摘效率。黄瓜采摘机器人由于收获环境复杂多变、机器人执行任务繁重、黄瓜与侧枝的生长特性不一等原因,加上图像处理和控制系统硬件和软件运转耗时,大多数采摘机器人的效率不高,黄瓜采摘机器人收获1个黄瓜需要23~28 s。使黄瓜自动化栽培系统实用化,提高采摘机器人作业效率是关键问题之一。

4.1.3 采摘机器人的制造成本较高 同工业机器人相比,由于作业对象柔嫩易损,为了保持果实完整性,采摘机器人的结构和控制系统更加复杂,制造成本更高。而且工作具有周期性、时间集中性等特点,导致设备利用率不高。对于采摘机器人这类复杂的光机电一体化产品而言,设备的使用和维护都需要相当高的技术水平和费用^[46]。

除此之外,还存在黄瓜采摘机器人的研制与农艺不协调,采摘机器人的安全可靠、多功能性、通用性、柔性作业不足等问题。鉴于以上原因,在以后的研究开发中必须解决以下几个方面的关键技术。

4.2 简化采摘机器人任务

在果蔬采摘机器人系统中,由于作业环境的复杂性,特别是果实生长位置的不确定性和果实部分遮挡或完全遮挡问题,导致机器人面临很多除了采摘任务外的附加难度作业,因此如何简化机器人任务还需要进一步研究。

4.2.1 改变栽培方式 通过改变栽培方式来简化作物收获环境,如黄瓜斜拉线与斜搭架栽培模式、甜椒通过拉线辅助根茎定位等,可以更好地将果实与茎叶隔离开,减轻图像处理单元的计算负担,加快图像处理单元的运转速度,从而缩短果实平均采摘周期。

4.2.2 改变果蔬品种 果实的生长位置是最具影响力的参数,通过改变黄瓜品种,培养和繁育出果实生长在根茎前方的黄瓜,使果实生长在机械手采摘可行域内采摘成功率最高、采摘周期最短的位置,以适应机械化采摘。其理想状态为黄瓜果实生长位置,即为采摘机器人设定最简收获位置。

4.2.3 增加附加机构 通过辅助机构来简化机器人任务,如通过吹风机来减少果实收获时的叶子遮挡率,通过落蔓吊蔓机构使黄瓜待采瓜藤段处于机械手采摘可行域内。

4.3 强化采摘机器人的性能

果蔬采摘机器人系统集成了传感技术、控制工程、机械设计和图像处理技术等关键技术,各部分功能的运转决定着果蔬采摘机器人运动的灵活性,仍需进一步研究以强化机器人性能。

4.3.1 多元化收集信息 果蔬采摘机与多功能信息化有机结合,结合传感器、模拟环境和推理运算来增强机器人的认知,多元化地收集信息,让机器人自适应地进行学习。

4.3.2 机械本体的优化设计 寻找最优机械手类型和末端执行器类型,机器人可以从标准化向专有化、结构简化的方向进行转化^[47],例如通过更换末端执行器实现黄瓜果实采收和侧枝修剪功能。无需设计完整的机器人,只需功能部件满足采摘要求即可,如蛇形机器人、攀爬机器人。这不仅是黄瓜采摘机器人未来的发展方向,也是果蔬采摘机器人的发展方向。

4.3.3 增加附加功能 如检测功能:收获时判断成熟度,评价果实内部品质,在果实分选阶段之前进行坏果剔除,可以避免向分选场运输坏果所造成的浪费。实现采摘机器人的多功能性,提高设备利用率,从而降低总成本。

5 结束语

完整的黄瓜自动化栽培系统由培育系统、移栽系统、吊落蔓系统、侧枝修剪机器人和黄瓜采摘机器人组成,主要作业对象包括黄瓜、侧枝、卷须、雄花及枯残叶等,在研究过程中要考虑果实完整性、工作高效性、操作简便性和价格合理性。本研究重点总结了国内外黄瓜采摘机器人和侧枝修剪机器人的研究现状,从机械本体结构、果实识别、运动规划等方面,概述了黄瓜采摘机器人的研究进展,为研究出一种安全可靠、柔性高效的黄瓜自动化栽培系统做准备,以响应“中国制造2025十大领域之农机装备和全国农业现代化之创新强农”的政策号召,不断提高技术装备和信息化水平,促进农业机械化提档升级,提高农作物机械收获水平,因地制宜地形成具有中国特色的自动化栽培技术。

参考文献:

- [1] 张洁,李艳文. 果蔬采摘机器人的研究现状、问题及对策[J]. 机械设计,2010,27(6):1-5.
- [2] 近藤直,田充司,野口伸共,等. 农业机器人(Ⅱ)[M]. 北京:中国农业大学出版社,2009:12-17.
- [3] Visser international trade & engineering B. V. [EB/OL]. [2013-03-05]. <http://www.visserite.com/index.php?id=5>.
- [4] 段晓凡,赖庆辉,鲁劲柏. 我国穴盘育苗播种机械的发展现状[J]. 现代农业,2016(7):94-96.
- [5] 张峰峰,王家胜,王东伟,等. 自动蔬菜穴盘苗精量播种机的设计与试验[J]. 农机化研究,2017,39(11):93-98.

- [6] Jin X, Li S J, Yang X J, et al. Developments in research on seedling auto-picking device of vegetable transplanter[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 364: 375-379.
- [7] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2014,45(8):44-53.
- [8] 胡建平,张晨迪,王留柱,等. 全自动温室钵苗移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊1):149-154.
- [9] 韩绿化,毛罕平,胡建平,等. 温室穴盘苗自动移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(11):59-67.
- [10] 陈一飞,路河,刘柏成,等. 日光温室草莓立体栽培智能控制系统[J]. 农业工程学报,2013,29(增刊1):184-189.
- [11] Ota T, Iwasaki Y, Yamane H, et al. Automatic spacing-controlled movable bench system for tomato production[J]. Engineering in Agriculture Environment & Food, 2016, 9(2):179-186.
- [12] Henten E J V, Hemming J, Tuijl B A J V, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(3):241-258.
- [13] 齐飞,汪晓云,丁小明,等. 一种温室作物的吊蔓装置及作物栽培方法:CN, CN102405797A[P]. 2012-04-11.
- [14] 鲁少尉,潘守江,尹义蕾,等. 番茄可移动吊蔓装置[J]. 安徽农业科学,2014,42(34):12376-12377.
- [15] 韩靖玲,刘全国,李聪晓,等. 双砧嫁接与吊落蔓器在雌性系秋黄瓜温室生产中的应用[J]. 北方园艺,2015(22):51-52.
- [16] 贾挺猛. 葡萄树冬剪机器人剪枝点定位方法研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2012.
- [17] 孔卫国. 美国研发出第二代葡萄修剪机器人[EB/OL]. (2010-03-26) [2017-10-09]. <http://www.winechina.com/html/2010/03/-20100325299.html>.
- [18] 杨庆华,贾挺猛,荀一,等. 葡萄树剪枝机器人系统:CN, CN202818996U[P]. 2013-03-27.
- [19] 吴良军,杨洲,王慰祖,等. 果树气动修剪机应用现状与发展趋势[J]. 现代农业装备,2013(1):54-57.
- [20] Fu G H, Liu X M, Chen Y F, et al. Fast-growing forest pruning robot structure design and climbing control[J]. Advances in Manufacturing, 2015, 3(2):166-172.
- [21] 李和良. 一种茶树修剪机:CN204762355[P]. 2015-11-18.
- [22] Grew D G. Cucumber harvesting machine:US2841947[P]. 1958-07-08.
- [23] Gilbert L. Cucumber harvesting machine:US 2893193A[P]. 1959-07-07.
- [24] Mitchell J F. Cucumber harvesting machine:US 3386236A[P]. 1968-06-04.
- [25] Leonard R K, Buchele W F. Machine and method for harvesting cucumbers:US, US3084496[P]. 1963-04-09.
- [26] Wilde L L. Cucumber-harvesting machine:US, US 3603067 A[P]. 1971-09-07.
- [27] Arima S, Kondo N. Cucumber harvesting robot and plant training system[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 1999, 11(3):208-212.
- [28] 周增产, Bontsema J, Kollenburg-Crisan L V. 荷兰黄瓜收获机器人的研究开发[J]. 农业工程学报,2001,17(6):77-80.
- [29] Henten E J V, Tuijl B A J V, Hemming J, et al. Field test of an autonomous cucumber picking robot[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(3):305-313.
- [30] Henten E J V, Slot D A V, Hol C W J, et al. Optimal design of a

王红君,常慧青,岳有军,等. 温室下无线传感器网络双簇头异构成簇算法的研究[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):180-183.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.044

温室下无线传感器网络双簇头异构成簇算法的研究

王红君¹, 常慧青¹, 岳有军¹, 赵 辉^{1,2}

(1. 天津市复杂系统控制理论与应用重点实验室/天津理工大学, 天津 300384; 2. 天津农学院, 天津 300384)

摘要:在温室下无线传感器网络中,采用基于低功耗自适应集簇分层型算法进行分簇时,存在簇分布不均匀及路由能量消耗过快的问题。因此,本研究基于双簇头异构成簇算法,优化了簇头选择算法。在分好的簇中部署 1 个异构节点做为第一簇头,根据能量因素选择另 1 个簇头,2 个簇头履行不同的职责,达到均摊能量消耗、延长网络生命周期的目的。其中,采用单跳与多跳结合方法将第一簇头节点信息传送到汇聚节点以达到提高传输效率的目的。仿真结果表明,该算法平衡了静态节点能耗,延长了网络存活时间。

关键词:温室;无线传感器网络;双簇头;异构节点;LEACH 算法

中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)05-0180-04

无线传感器网络指部署的微型传感器节点利用无线通信的方式得到的多跳自组织网络系统,其作用是获取监控区域的目标信息并发送给观察者^[1]。在设施温室中部署传感器节点可以实现对农作物和环境的实时监测,但由于传感器节点体积小并且采用电池供电时其能源和带宽非常有限,因此,研究如何在温室环境下延长网络的生命周期是一个有待解决

的问题。无线传感器网络体系结构见图 1^[2]。

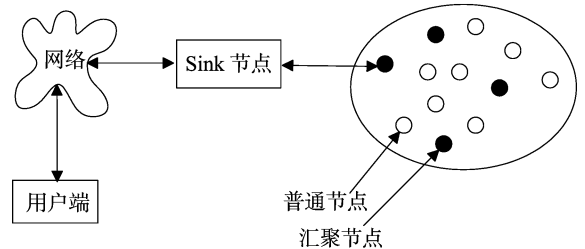


图1 无线传感器网络结构

目前,众多学者对路由协议进行了大量研究,如(low energy adaptive clustering hierarchy,简称 LEACH^[3])、(directed diffusion,简称 DD^[4])、(geographical and energy aware routing,

收稿日期:2017-12-21

基金项目:天津市农业科技成果转化与推广项目(编号:201203060、201303080)。

作者简介:王红君(1963—),女,天津人,硕士,教授,硕士生导师,研究方向为流程工业先进控制技术。E-mail:hongewang@126.com。
通信作者:常慧青,硕士,主要研究方向为网络控制理论与技术。
E-mail:623516651@qq.com。

cucumber harvesting robot[J]. In: Proceedings of the XVIth CIGR World Congress, September 3-7, 2006, Bonn, Germany; Agricultural engineering for a better world, 2006.

[31] Henten E J V, Slot D A V, Hol C W J, et al. Optimal manipulator design for a cucumber harvesting robot[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 247-257.

[32] Henten E J V, Schenk E J, Willigenburg L G V, et al. Collision-free inverse kinematics of a 7 link cucumber picking robot[J]. Acta Horticulturae, 2008, 801: 65.

[33] Bac C W, Henten E J, Hemming J, et al. Harvesting robots for high-value crops: state of the art review and challenges ahead[J]. Journal of Field Robotics, 2015, 31(6): 888-911.

[34] 钱少明, 杨庆华, 王志恒, 等. 黄瓜抓持特性与末端采摘执行器研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 107-112.

[35] 熊俊涛, 叶 敏, 邹湘军, 等. 多类型水果采摘机器人系统设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 230-235.

[36] 冯青春, 纪 超, 张俊雄, 等. 黄瓜采摘机械臂结构优化与运动分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊1): 244-248.

[37] 李 伟, 袁 挺, 冯青春, 等. 一种温室环境下黄瓜采摘机器人系统及采摘方法: CN, CN101356877[P]. 2009-02-04.

[38] Tang X, Zhang T, Liu L, et al. A new robot system for harvesting

cucumber[C]// 2009 Reno, Nevada, June 21-June 24, 2009. 2009: 3873-3885.

[39] 纪 超, 冯青春, 袁 挺, 等. 温室黄瓜采摘机器人系统研制及性能分析[J]. 机器人, 2011, 33(6): 726-730.

[40] 李 伟, 杨振宇, 农克俭, 等. 单轨黄瓜智能收获机: CN103053267[P]. 2013-04-24.

[41] 杨振宇, 刘发英, 王 勇. 自导航温室黄瓜收获机器人的研究[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 225-229.

[42] 葛宜元, 吴庆越, 李 瞳, 等. 黄瓜采摘机械手系统研究[J]. 农机使用与维修, 2016(1): 1-4.

[43] 戚利勇. 黄瓜采摘机器人视觉关键技术及系统研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.

[44] 赵相飞. 基于纹理颜色的温室大棚黄瓜图像识别[D]. 天津: 天津理工大学, 2017.

[45] 汤修映, 张铁中. 黄瓜收获机器人避碰轨迹规划[C]. 中国农业机械学会 2008 年学术年会, 2008: 98-102.

[46] 方建军. 采摘机器人开放式控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 83-86.

[47] Bac C W, Henten E J, Hemming J, et al. Harvesting robots for high value crops: state of the art review and challenges ahead[J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31(6): 888-911.