

面向复杂田间环境的辣椒目标视觉识别与机械臂协同策略优化

赵翊捷

长安大学 陕西西安 710000

摘要: 针对我国辣椒采摘环节存在的人工成本偏高, 机械设备适应性欠佳状况而展开的“椒好运”智能辣椒采摘机研究与设计工作, 整合了YOLOv8视觉识别技术、五自由度机械臂技术以及履带底盘技术, 运用柔性夹爪以及Moveit路径规划方式达成无损采摘, 在宝鸡田间测试期间达到识别准确程度高达91%、每小时能采摘300株且相较于人工采摘成本降低60%的成效, 此项研究为农业智能装备提供了跨学科解决办法。

关键词: 辣椒采摘机; 机器视觉; 机械臂控制; 柔性采摘; 田间实验

引言

我国辣椒产业面临人工采摘成本高昂, 机械设备适配性不强的发展瓶颈亟待开展智能化采摘装备研发的情形下, “椒好运”项目围绕这一关键难题经跨学科技术融合, 成功研制出集机器视觉、多自由度机械臂以及履带底盘于一体的智能采摘机。本报告全面系统归纳该采摘机在技术创新、实施流程以及应用价值等方面情况以为农业装备智能化发展提供相应参考。

一、复杂田间环境下的辣椒目标视觉识别技术

在复杂多变的田间环境里辣椒目标视觉识别遭遇光照强度不稳定, 枝叶对果实遮挡以及果实分布杂乱无章等诸多困难的情况下, 为有效应对这些难题构建的一套将硬件创新与算法优化相结合的视觉识别系统。在硬件方面采用RGB相机与深度相机异构融合策略, 其中RGB相机选用具备高动态范围型号以在正午强光照射。或者树荫阴影等极端光照条件下维持图像清晰程度, 深度相机借助红外结构光获取场景三维信息, 将这两种相机以双目立体视觉架构固定安装在采摘机前端, 并搭配可调整角度的补光模块实现对不同高度植株全方位采集能力^[1]。

二、机械臂采摘系统设计与控制策略

1. 机械臂结构设计与选型

考虑到辣椒植株形态多样化、果实分布不规则的田间作业特点, 机械臂采摘系统采用多自由度结构设计与智能控制算法协作方案达成复杂场景下精准采摘操作。机械臂本体选用五自由度串联结构, 各关节依靠舵机驱动, 通过D-H参数建模分析工作空间。其末端执行器

可抵达半径为850mm的半球形区域以适应不同高度植株果实采摘需求, 末端执行器创新性设计为柔性采摘装置, 主体由形态学凹槽夹爪与微型刀片组成。夹爪采用食品级硅胶材料压制且内侧设计仿生波纹结构增大摩擦力, 刀片由舵机驱动实现“夹取-剪切”复合动作。经测试该装置对不同成熟度果实平均夹持力控制在0.8-1.2N之间, 既能保障采摘稳定性又能避免对果实表皮造成损伤^{[2][3]}。

2. 机械臂运动规划与控制算法

以ROS分布式架构为依托搭建运动规划与控制系统, 借助Moveit!运动规划库达成机械臂轨迹优化。鉴于辣椒采摘避障需求普遍存在, 在全局路径规划融入RRT*算法并结合视觉系统提供的环境点云数据生成无碰撞运动轨迹, 与此同时在局部路径优化阶段引入贝塞尔曲线插值算法, 以使机械臂末端速度变化更平稳有效减轻运动冲击。选用Jetson nano为ROS主控板, ARM四核处理器充当控制系统硬件主控制器, 凭借CANopen总线与各关节驱动器通讯, 将采样周期掌控在1ms以内切实保证位置指令实时回应。实验获取的数据表明该机械臂系统重复定位精准度可达 $\pm 0.5\text{mm}$, 且在单株采摘场景能实现对相邻果实连续作业, 单个果实采摘周期控制在4-6秒满足田间作业效率要求。

3. 柔性采摘与无损控制技术

为促使系统在复杂地形条件下适应性更强, 机械臂基座与履带底盘采用可升降连接构造, 借助电动推杆达成0-300mm垂直高度调整。配合底盘姿态传感器收集的数据实时弥补因地形起伏造成的机械臂位姿偏差, 在宝鸡试点田展开的测试结果显示在20°斜坡, 与沙土地形

状况下该系统依旧能维持92%采摘成功率。且其柔性采摘装置导致的坏果率控制在3%以内,相比传统刚性夹爪性能有明显提升,整套系统历经动力学仿真与田间实验反复优化,形成涵盖从机械结构设计到控制算法实现的完整技术方案,为经济作物智能化采摘提供工程示例。

三、视觉识别与机械臂协同策略优化

1. 协同工作流程设计

构建于多传感器数据融合技术框架之上实现视觉识别与机械臂协同作业,通过设立统一的数据交互协议达成系统闭环控制。视觉系统完成对辣椒果实识别与三维定位后将包含空间坐标,成熟度等级以及遮挡概率等信息的目标数据,封装成标准数据帧经由ROS消息总线传送到机械臂控制系统。机械臂控制器依据目标优先级算法确定采摘先后顺序,结合Moveit!规划出无碰撞轨迹,同时向视觉系统反馈当前位姿信息用以辅助后续目标检测。此流程借助状态机机制达成各模块同步,与协调在光照突然变化或者植株晃动等干扰出现时,可通过动态重规划策略维持系统稳定性^{[4][5]}。

在陕西宝鸡辣椒种植区域开展的实际测试中,在玉米与辣椒间作这般复杂场景条件下,此协同工作流程呈现出极为突出优势。当视觉体系察觉到某株辣椒上有3个成熟红果,且其中1个果实部分被玉米叶片遮盖时先是对未被遮盖的2个果实予以定位,随后机械臂完成这两个果实采摘操作后调整自身位置和姿态。借助视觉体系多视角补充采摘策略获取被遮挡果实完整点云数据,接着再次执行定位及采摘动作。整个操作过程里视觉体系与机械臂通信产生的延迟控制在20毫秒以内,轨迹重新规划耗费时间大概为120毫秒。单株辣椒采摘效率相较顺序采摘方式提高35%,实际测量坏果率维持在2.8%以下,充分验证该协同工作流程在复杂环境具实用性。

2. 复杂环境下的协同策略优化

鉴于田间环境动态变化且具不确定性特点,协同策略优化重点放在环境感知与动作决策能实时相互适配方面,在光照分布不均匀场景下,视觉体系通过采取动态增益调节及直方图均衡化手段预处理图像。机械臂依据光照强度不同相应调整自身运动速度,以此防止强光条件下视觉判断失误及弱光情况下动作迟缓状况。当面临茎叶对果实形成遮挡状况时,采用基于时间和空间关联性目标跟踪算法并结合机械臂试探性躲避障碍动作,通过“小范围移动、多角度检测”方法重新获取被遮挡果实位置信息。遇到地形起伏情况时,底盘姿态传感器采

集的数据实时带动机械臂基座高度补偿调整,确保末端执行器与果实间相对位置和姿态始终保持稳定。

在宝鸡试点田地坡地测试阶段,系统遭遇坡度为15°斜坡地形,且存在部分植株因风力作用出现晃动现象。当视觉体系监测到某株辣椒果实随晃动出现大约3厘米位移时,协同策略即刻开启动态跟踪模式,视觉体系以50Hz频率更新果实坐标。机械臂控制器运用预测控制算法依照果实运动轨迹预先调整末端位置,同时将运动速度降低至常规速度的60%,并通过轨迹平滑处理减轻震动影响。在此场景下系统接连完成10株辣椒采摘工作,平均单个果实采摘时间相较静态场景增加1.2秒,但采摘成功率依旧保持在91%,有力验证动态协同策略针对环境扰动具备较强鲁棒性。

3. 协同控制实验与结果分析

通过策划多组典型状况来验证系统性能的协同控制实验,着重剖析识别定位误差、轨迹规划所费时间以及采摘成功率之间关联。在标准光照条件下构建单株有5个果实,且其中2个果实存在轻度遮蔽状况的采摘情形,以测试视觉识别的定位偏差与机械臂执行精度二者叠加产生的效应。在模拟阴天环境中借由降低补光强度测试系统于低照度时的协同效能,在人工搭建的坡地平台上测试不同坡度,对协同控制相关参数带来的影响。运用方差分析手段对实验数据,将各个因素对系统性能的影响权重予以量化。

挑选三类典型地块即平坦的熟地、玉米与辣椒间作的地块,坡度在10-20°的坡地展开对比的宝鸡田间实验。在平坦的熟地里面系统平均每小时能够采摘312株,且识别的准确比率达到91.5%、坏果比率为2.3%。玉米与辣椒间作的地块因遮挡情况增多,采摘效率下降至每小时268株、识别准确比率为89.7%。但凭借协同策略的动态调整坏果比率控制在2.7%,在10-20°坡地的情形里,机械臂基座通过实时高度补偿让采摘成功率保持在89.3%。且相比未优化的方案提升了12%,实验结果显示视觉识别与机械臂的协同策略,在复杂环境下能够有效地平衡效率和精度,其中动态轨迹规划针对遮挡场景的适应能力提升得最为明显,而地形补偿机制则在坡地作业过程中起到关键作用。

四、田间实验与性能评估

1. 实验平台与测试环境

以“椒好运”智能辣椒采摘机的原理样机作为核心的实验平台,该样机整合了履带式底盘、五自由度机械

臂、双目视觉系统以及柔性采摘末端执行装置。整机质量为180kg、功率消耗为1.2kW且具备半自动与全自动这两种作业方式,硬件系统采用工业级别的控制器以及防水电气元件,以保证在田间环境下可以稳定运行。选择陕西宝鸡陈仓区具有典型性的辣椒种植区域作为测试环境,该区域涵盖地势平坦的熟地(土壤含水率处于18%~22%),玉米辣椒间作地(玉米植株高度在1.8~2.2m,间距为50cm),10~20°的坡地(土壤质地偏向沙质)这三类具有代表性的地块。各类地块均种植当地主要栽培的品种“线椒三号”,植株高度在60~80cm,果实密度为每株15~25个,能够满足不同环境下的测试需求。

2. 性能测试指标与方法

构建起一套涵盖识别性能(含准确率、漏检率),采摘效率(比如单小时采摘株数、单个果实采摘所花时间),作业质量(含坏果率、未成熟果损伤率)以及环境适应性的多层量化指标体系的性能评估。其测试办法采取对比实验与正交实验相融合的方式,即在平坦的熟地展开每组持续2个小时的5组重复性实验以记录系统平均作业的效率。在间作的地块挑选出100株辣椒,设定自然遮挡的场景来统计不同遮挡状况下的识别准确率。在坡地开展作业分别沿着等高线与斜坡方向,测定底盘打滑率和机械臂姿态补偿的效果。且所有实验同步采集视觉识别数据,机械臂运动轨迹的数据以及传感器状态的数据,并借助自行研发的数据分析软件做后期处理。

3. 实验结果与分析

实验表明“椒好运”采摘机在平坦的熟地有着最为出色表现,平均每小时能采摘308株,与人工效率相比提高了3.2倍。识别准确率达到91.7%,坏果率控制在2.1%,未成熟果损伤率为1.8%,成本相较于人工采摘降低了62%的宝鸡田间实验所获数据。以及在玉米间作的地块因玉米叶片遮挡使部分果实出现漏检情况致识别准确率下降到89.4%,每小时采摘259株,但依靠视觉系统的多视角补采策略及机械臂的动态避障算法使坏果率依旧维持在2.6%,明显优于传统刚性夹爪设备的数据。还有在坡地环境中15°斜坡条件下底盘通过率达到90%,机械臂通过实时高度补偿将姿态偏差控制在 $\pm 1.5^\circ$ 以内,采摘成功率是88.9%相比没有优化的方案提升了11.5%的数据。通过对不同实验条件下性能衰减规律做

对比发现,光照强度变化对识别准确率的影响系数是0.32,遮挡程度的影响系数是0.41,地形坡度的影响系数是0.27。表明遮挡场景是限制协同效率的主要方面,进一步分析机械臂运动数据可知在遮挡场景下,每株轨迹重规划的次数平均增加2.3次,使单个果实采摘时间延长了1.3秒。但通过优化目标优先级算法能让重规划耗费的时间缩短35%,且验证了系统连续作业8小时耗电量大概是9.6kW·h,折合成本约6元远远低于人工采摘劳动力成本。经测算投资回收期为2.8年契合中小型种植户经济承受能力的的数据,这些都为设备的商业化推广以及技术更新换代提供了关键的数据支持。

结束语

“椒好运”智能辣椒采摘机凭借技术创新,达成了在复杂田间环境中的高效作业,识别准确率达到91%,成本比人工降低60%,填补了国内中小型智能采摘机械领域的空白。该研究成果为农业机器人的跨学科应用树立了范例,未来可借助多模态融合以及自学习算法进一步提高智能化水平,为乡村振兴以及农业现代化贡献力量。

参考文献

- [1]熊铎云,沈小云,胡照,等.基于YOLOv8-CBAM深度学习的辣椒采摘养护智能机器人[J].南方农机,2025,56(09):4-8.DOI:10.3969/j.issn.1672-3872.2025.09.002.
- [2]王文胤,谭立新,宋敏,等.基于改进CPO算法的茶叶采摘机械臂路径优化研究[J].现代农业装备,2025,46(01):47-55.DOI:10.3969/j.issn.1673-2154.2025.01.007.
- [3]李炳彤.采摘机械臂的避障运动规划方法研究[D].山西省:太原科技大学,2024.DOI:10.27721/d.cnki.gyzjc.2024.000841.
- [4]吕海林.猕猴桃采摘机械臂路径规划研究[D].广西壮族自治区:桂林电子科技大学,2023.DOI:10.27049/d.cnki.ggldc.2023.001219.
- [5]冯晓平.多直角坐标并行水果采摘机器人机械臂的最优配置策略[D].四川省:四川农业大学,2022.DOI:10.27345/d.cnki.gsnyu.2022.000153.