doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.008

基于双目相机和深度学习的电驱动自走悬臂式仿形采茶机设计与试验

张　硕　王述杰　周星野　秦名扬　陈　雨　靳红玲
(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对目前大宗茶采收效率低、质量不稳定、劳动强度大的问题,结合茶园地形环境特征、种植管理要求及农艺作业规范,设计了一种电驱动自走悬臂式仿形采茶机。首先,开展了电驱动自走悬臂式仿形采茶机整机结构设计,包括履带式底盘、位姿调整装置、茶叶采收装置和图像采集装置等 4 部分;其次,基于双目相机与 YOLO v8s 算法实现对茶蓬面鲜叶的实时检测和定位,采用最小二乘法求解采茶机理论作业位姿,通过位姿自适应调整装置和智能采收执行机构的协同作用,完成仿形调控与大宗茶自动化采收;最后,研制了自走悬臂式仿形采茶机样机,开展整机稳定性分析,明确转场与作业工况下纵坡、横坡极限翻倾角范围,验证整机安全作业边界,并在茶园开展了大宗茶实地采收试验。试验结果表明:茶叶采收过程中整机位姿误差稳定控制在预设阈值内,实际作业位姿可动态适配茶树蓬面的高度与倾斜角度变化;鲜叶平均芽叶完整率达 83.9%,漏集率 0.74%,漏采率 0.95%,一芽三叶及以下芽叶占比 87.8%,各项指标均符合采茶机作业质量行业标准,为大宗茶高效、精准采收提供了技术装备支撑。

关键词: 仿形采茶机; 机器视觉; 深度学习; 嵌入式控制
中图分类号: S225.93　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)13-0116-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Self-propelled Cantilever Profiling Tea-picking Machine Based on Binocular Vision and Deep Learning

Zhang Shuo　Wang Shujie　Zhou Xingye　Qin Mingyang　Chen Yu　Jin Hongling
(*College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Aiming to address the current challenges of low efficiency, inconsistent quality, and high labor intensity in bulk tea harvesting, a motorized self-propelled profiling tea harvester was designed by incorporating the topographic and environmental characteristics of tea plantations, cultivation management requirements, and agronomic operational protocols. Firstly, the overall structural design of the electric-driven self-propelled cantilever profiling tea harvester was carried out, including four parts: the crawler chassis, posture adjustment device, tea harvesting device, and image acquisition device. Subsequently, a binocular camera and YOLO v8s were employed to detect and locate fresh leaves on the tea canopy in real time, after which the least squares method was used to solve the theoretical operating posture of the tea harvester. Through the coordinated action of a posture adaptive adjustment device and an intelligent harvesting actuator, profiling control and automated harvesting of bulk tea were achieved. Finally, a prototype of the self-propelled cantilever profiling tea harvester was developed. The stability of the entire machine was analyzed to determine the critical tipping angles under longitudinal and transverse slopes during both transfer and operation conditions, thereby verifying the safe operating boundaries. Field harvesting experiments for bulk tea were conducted in a tea plantation. The experimental results demonstrated that the positional error of the machine remained consistently within the preset threshold during the tea harvesting process, and the actual working posture dynamically adapted to changes in the height and tilt angle of the tea canopy. The average bud integrity rate reached 83.9%, with a missed collection rate of 0.74% and a missed picking rate of 0.95%. The proportion of apical buds with three

收稿日期: 2026-03-09　修回日期: 2026-03-18
基金项目: 陕西省农业关键核心技术攻关项目(2025NYGG009)和陕西省重点研发计划项目(2025NC-YBXM-223)
作者简介: 张硕(1989—),男,副教授,博士,主要从事农机装备智能化控制方法研究,E-mail: zhangshuo@nwafu.edu.cn
通信作者: 靳红玲(1975—),女,副教授,博士,主要从事智能农业装备智能化设计研究,E-mail: jhl@nwsuaf.edu.cn

leaves or fewer accounted for 87.8%. All performance indicators met the industry standards for tea harvester operation quality, providing technical and equipment support for efficient and precise harvesting of bulk tea.

Key words: profiling tea harvester; machine vision; deep learning; embedded control

0　引言

我国是茶叶生产大国,茶园面积与茶叶产量均位居世界首位。然而,茶产业发展的机械化水平长期显著滞后,数据显示当前茶园综合机械化率不足35%,且普遍面临农机装备适用性不足的技术瓶颈[1]。其中,茶鲜叶采收作为核心生产环节之一,具有作业强度大、劳动负荷重、季节性强等突出特点。随着茶园规模化扩张与农村劳动力老龄化加剧,劳动力短缺与成本攀升的双重挑战已演变为制约产业升级的核心矛盾[2]。因此,提升茶叶采收机械化水平已成为保障茶产业可持续发展的必然选择。大宗茶作为国内茶叶总产量的主体,其庞大的产量和相对较低的采收标准使得大宗茶机械化、智能化采收成为必然趋势[3]。

近年来,国内外学者围绕采茶装置的不同安装方式,对跨置式(横跨茶蓬)和悬臂式(行间行进)两类自走式采茶机展开了系统研究[4-14],研究热点均聚焦于茶鲜叶的智能识别和精准采收。针对跨置式采茶机,现有研究基于机器视觉、超声波测距、2D/3D LiDAR 传感、接触式仿形等多种技术,完成茶叶嫩芽智能识别、割刀调平与高度自适应调节、复杂蓬面仿形采收、履带底盘行驶稳定性优化等研究,研制出具备对应功能的采茶机与配套系统。跨置式采茶机凭借高效率优势,在种植标准化、地势平坦的规模化茶园中表现突出,但受限于我国丘陵山地茶园占比高的现实条件(如:行距狭窄、密植栽培普遍、农艺管理标准化程度低),推广难度较大。相较于跨置式,悬臂式采茶机因结构灵活性更适配复杂地形,成为近年研究热点,研究主要基于接触式传感器、激光传感器、接近开关等多种感知策略,对蓬面位置与高度检测、作业位姿自适应调节、选择性采摘技术等方向开展研究,对于缓坡、坡地等复杂地形下的自适应采收技术进行探索。尽管现有研究推动了悬臂式采茶机的技术进步,但其仍面临两大核心瓶颈:现有机型多采用燃油驱动,技术装备成熟度不足;嫩芽识别与仿形技术多停留在理论验证阶段,难以实现茶蓬面的精准仿形采收,导致鲜叶老嫩不匀、叶梗混杂、破损率高等问题突出。

近年来,机器视觉和深度学习技术的快速发展为农业精准作业带来了新的研究方法[15-24]。其中,深度卷积神经网络(如 YOLO 系列目标检测算法)因兼具高检测精度与实时性优势,在农产品分选、病虫害识别等领域广泛应用[25-31]。针对现有采茶机接触式传感易损伤茶树且测量受干扰、激光仿形难以实现茶蓬面精细三维感知、燃油驱动不符合茶园环保要求、仿形控制仅单一高度调节无多姿态适配等核心技术短板,本文提出一种机电式模块化自走悬臂式仿形采茶机设计方案:通过机器视觉技术构建基于 YOLO v8 算法的茶鲜叶目标检测模型,结合 ZED2i 型双目立体相机获取的三维点云数据,实现茶蓬面芽叶空间坐标定位;基于最小二乘法构建采收位姿参数解算方程,建立割刀轨迹与茶蓬面的自适应吻合机制;搭建以 STM32 为核心的嵌入式控制系统,设计作业高度、俯仰角、横滚角多自由度姿态调节策略,采用闭环控制方法对采收装置实现作业高度、俯仰角和横滚角的动态精准调整,以解决鲜叶采收老嫩不匀、破损率偏高、地形适应性不足等问题。

1　结构设计与分析

1.1　总体设计

通过调研陕西省商洛市商南县宜机化管理的条栽茶园可知,采收时茶树行间间距 70 ~ 85 cm,茶树蓬面宽度 90 ~ 110 cm,蓬面高度 70 ~ 90 cm。

电驱动自走悬臂式仿形采茶机整机结构如图 1 所示,主要由履带式底盘、位姿调整装置、茶叶采收装置和图像采集装置 4 部分组成。其中,履带式底盘是行走装置,用于搭载位姿调整装置和茶叶采收装置;位姿调整装置通过基底安装在履带式底盘上,用于调整茶叶采收装置的作业位姿;茶叶采收装置通过固定板搭载于位姿调整装置上,负责茶鲜叶的采收作业;图像采集装置固定于轴承上,用以获取茶鲜叶的图像信息和深度数据。该采茶机在茶园行间作业时,单次可采收一垄茶叶。

1.2　关键部件设计

1.2.1　底盘选型

底盘选型主要考虑采茶机在茶园行驶时的通过性、爬坡性、环保性以及承载能力等因素。选用电驱动履带式底盘可保障采茶机在转场和在坡地茶园作业的通过性,同时可原地 360°回转,且底盘重心低,稳定性好[32]。考虑茶园行间间距、整车稳定性和动力校核,选取履带式底盘的总体尺寸(长 × 宽 × 高)

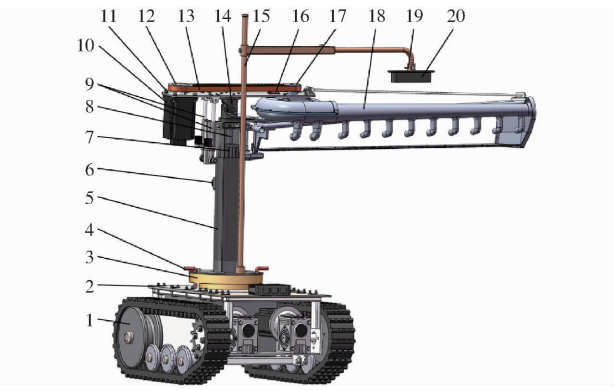


图 1 自走悬臂式仿形采茶机结构图

Fig. 1 Structural diagram of self-propelled cantilever profiling tea harvester

1. 履带式底盘 2. 基底 3. 轴承 4. L 型插销 5. 外支撑方管 6. 位移传感器 7. 直线电缸 8. 内支撑方管 9. 电动推杆 10. 直流无刷电机 11. 固定板 12. 主动带轮 13. 同步带 14. 万向节 15. 相机支架 16. 倾角传感器 17. 从动带轮 18. 茶叶采收装置 19. 姿态传感器 20. 双目相机

为 0.87 m×0.68 m×0.30 m,橡胶履带宽度 0.1 m,每侧履带接地长度 0.47 m,在每侧履带各配有一个 1.5 kW 的三相直流无刷电机,动力电池规格采用 48V－110A·h 的锂电池。

1.2.2 位姿调整装置设计

位姿调整装置主要由旋转机构、高度调节机构和姿态调整机构组成。其中旋转机构由基底、轴承和 L 型插销组成,基底固装在底盘上,轴承内圈固连于基底,通过轴承外圈的旋转带动茶叶采收装置完成纵向(转场模式)和横向(作业模式)的方位调整,并利用贯穿于轴承外圈和基底的 L 型插销固定茶叶采收装置的位置,解决采茶机田间转场通过性与采收作业稳定性不兼容的问题;高度调节机构由外支撑方管、内支撑方管和直线电缸组成,外支撑方管固装在轴承外圈上,直线电缸底部与外支撑方管下端固连,其顶部与内支撑方管固连,当直线电缸动作,驱动内支撑方管沿外支撑方管内壁上下滑动,实现茶叶采收装置的升降;姿态调整机构由万向节、固定板和两个电动推杆组成,万向节及电动推杆的上、下两端分别固连于固定板和内支撑方管上,固定板上连接茶叶采收装置,控制两个电动推杆动作会实现固定板的纵倾和侧倾,对应调整茶叶采收装置的实际俯仰角 λ_1 和实际横滚角 σ_1,其中 $\lambda_1 \in [5°, 10°]$,$\sigma_1 \in [-5°, 5°]$。

1.2.3 茶叶采收装置设计

茶叶采收装置由直流无刷电机、主动带轮、从动带轮、同步带和采收机构等组成,考虑到整机的平衡性,将 S110BL170－415－19J35 型直流无刷电机(北京时代超群电器科技有限公司)和采收机构(SV120H 型双人采茶机拆掉汽油机,浙江川崎茶叶机械有限公司)分别固装于固定板两端。作业时,直流无刷电机通过同步带将动力从主动带轮传递给从动带轮,从动带轮驱动采收机构动作实现对茶鲜叶的切割、收集。

SV120H 型双人采茶机作业时的汽油机额定转速 v_e = 8 500 r/min,直流无刷电机额定转速 v_a = 3 000 r/min,确定同步带传动的传动比 i,并采用一级传动方式和张紧轮外置的张紧方式,传动比计算公式为

$$i = \frac{v_a}{v_e} = \frac{3\,000}{8\,500} = 0.353 \tag{1}$$

1.2.4 图像采集装置设计

图像采集装置主要由双目相机和相机支架组成,ZED2i 型双目立体相机(StereoLabs 公司,美国)工作分辨率设定为 1 920 像素×1 080 像素。该装置通过相机支架固定于轴承上,并利用支架上调节机构调整相机的高度和在悬臂方向上的布置距离,实现相机的视野范围能适配不同茶蓬面幅宽。

2 仿形控制系统设计

2.1 硬件系统设计

控制系统硬件由计算机、双目相机、微控制器、多种传感器及电机驱动器组成,控制系统原理如图 2 所示。其中,计算机和双目相机组成上位机控制系统,计算机通过 USB Type－C 实时获取双目相机茶鲜叶图像及距离信息,利用构建的茶蓬面拟合模型解算茶叶采收装置的理论作业位姿,并将相关数据通过 USART 发送给微控制器。微控制器、姿态传感器、倾角传感器、位移传感器及电机驱动器等组成下位机控制系统。微控制器(型号 STM32F103ZET6,星翼电子科技有限公司)负责接收上位机指令和多种传感器的数据,计算并输出电动推杆和直线电缸的目标位移量;姿态传感器(型号 MPU6050,星翼电子科技有限公司)固定于双目相机上,负责补偿双目相机受平地、缓坡、丘陵等地形影响产生的倾斜角度;倾角传感器(型号 SINDT,维特智能科技有限公司)安装于固定板上,负责监测、反馈实际作业位姿中的俯仰角和横滚角;位移传感器(型号 BRT38,布瑞特科技有限公司)底端固定于外支撑方管,上端连接内支撑方管,负责监测并反馈实际作业位姿中的作业高度信息;电动推杆(型号 BST－YF－A－BZ,博斯图工业技术有限公司)和直线电缸(型号 57C－4S－200－O,英鹏飞机电有限公司)中的电机均为 57 型步进电机,分别由两组电

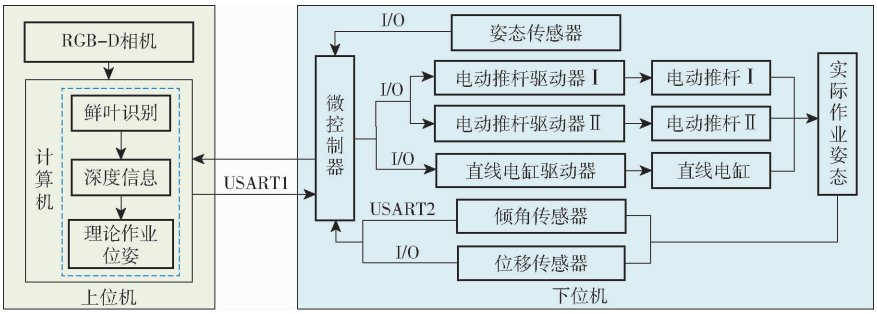


图 2　作业位姿控制系统原理图

Fig. 2　Schematic of operational pose control

机驱动器(型号 DM542,常州市鸥柯达电器有限公司;型号 DM570,深圳市英鹏飞机电有限公司)控制。上位机和下位机通过 USART1 实现通信,上位机将茶叶采收装置的理论作业位姿发送给下位机,同时下位机将茶叶采收装置实际作业位姿反馈给上位机。

2.2　位姿控制流程

控制系统执行流程如图 3 所示。作业时,计算机对双目相机实时采集的茶鲜叶图像进行检测、定位后,利用构建的采收位姿参数解算方程求解采茶机的理论作业位姿,获取理论的作业高度 Z_{w2} 和横滚角 σ_2,并通过 USART1 将上述位姿参数传输给微控制器;同时,微控制器通过位移传感器和倾角传感器分别采集茶叶采收装置实际的作业高度 Z_{w1}、俯仰角 λ_1 和横滚角 σ_1 等实时作业位姿信息,计算各参数实际值与理论值的偏差;微控制器通过比较各位姿参数的实际偏差与预设阈值,判断采收装置的作业位姿是否需要调整,若需要,则将偏差转换为直线电缸与电动推杆的脉冲值,驱动执行机构动作进行位姿修正;同时,位移传感器和倾角传感器实时监控、反馈实际作业位姿的变化,形成闭环控制,保证调整后实际作业位姿与理论作业位姿的偏差稳定控制在预设阈值范围内。

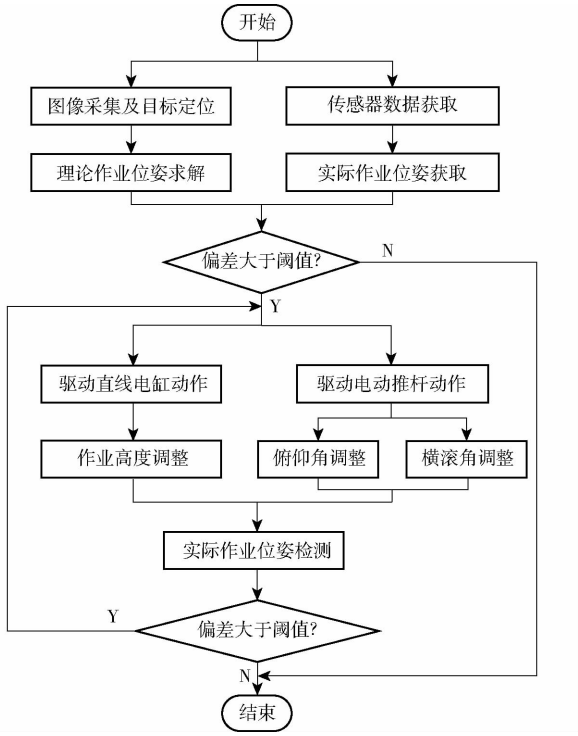


图 3　作业位姿控制系统流程图

Fig. 3　Flowchart of operational pose control system

2.3　理论作业位姿确定

2.3.1　茶鲜叶检测与定位

(1)图像采集与数据集构建

2023 年 6 月中旬和 7 月上旬,在陕西省商洛市商南县沁园春茶园中进行图像采集,试验装置见图 4,双目相机的高度需调整至相机的视野能覆盖茶蓬面幅宽。通过操控履带式底盘,分别采集定点图像和动态视频,分辨率均为 1 920 像素 ×1 080 像素,行进速度为采茶机的作业速度。同时,选取了 3 个不同光照强度的时间段以及晴天、阴天等不同天气下的图像,增加数据集的多样性(图 5)。



图 4　图像采集过程

Fig. 4　Image acquisition process

1. 履带式底盘　2. 图像采集支架　3. 计算机　4. 双目相机

本研究为提升 YOLO 模型的检测精度与稳定性,以大宗茶鲜叶中形态特征最具代表性的“一芽一叶”作为检测目标,利用矩形区域标注工具 LabelImg 对图像进行人工标记,明确目标茶鲜叶的类别信息和位置坐标,保存标注结果为 txt 格式,完

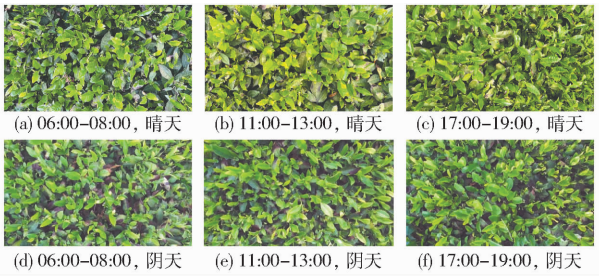


图 5 茶鲜叶图像

Fig. 5 Fresh tea leaf image

成茶鲜叶数据集的构建。本研究将原始图像按照 8∶1∶1的比例随机划分为训练集(896 幅)、验证集(112 幅)和测试集(112 幅)。

(2)茶鲜叶检测模型训练

采用 YOLO v8 目标检测算法建立茶鲜叶检测模型。模型训练参数如下:迭代轮次为 300,批量大小为 4,图像尺寸为 640 像素 ×640 像素,学习率为 0.01,权重衰减为 0.000 5,梯度动量为 0.937。YOLO v8 根据不同深度和宽度的网络可分为 YOLO v8n、YOLO v8s、YOLO v8m、YOLO v8l、YOLO v8x 共 5 种模型,本文采用同一数据集分别对这 5 种网络进行茶鲜叶检测训练和测试,结果如表 1 所示。

表 1 模型检测效果对比

Tab. 1 Comparison of model recognition effects

模型	精确率/%	召回率/%	平均精度/%	推理速度/(f·s^{-1})	模型内存占用量/MB
YOLO v8n	77.6	81.8	87.9	71.4	5.93
YOLO v8s	79.4	82.3	88.7	62.7	21.4
YOLO v8m	79.3	81.3	88.5	41.7	49.5
YOLO v8l	81.0	81.0	88.9	33.3	83.5
YOLO v8x	81.7	80.7	89.1	28.6	130.1

由表 1 可知,随着 YOLO v8 系列模型内存占用量的增大,综合检测性能整体呈上升趋势,但模型越大推理速度越慢,对部署设备的性能要求越高;YOLO v8s 与 YOLO v8m、YOLO v8l、YOLOv8x 相比,具有出色的检测效率,并在模型内存占用量方面,YOLO v8s 分别减小了 56.8%、74.4%、83.6%,虽略大于 YOLO v8n,但相比于 YOLO v8n 的精确率提高 1.8 个百分点,召回率提高 0.5 个百分点、平均精度提高 0.8 个百分点;同时,YOLO v8s 的检测速度超过60 f/s,满足茶鲜叶实时检测的任务需求。综上,本研究确定选用 YOLO v8s 模型开展茶鲜叶检测,效果如图 6 所示。



图 6 YOLO v8s 茶鲜叶检测效果

Fig. 6 YOLO v8s tea fresh leaf detection effect

(3)目标坐标求取

双目相机视觉范围内任意一点 P 的像素坐标与其世界坐标(X_w,Y_w,Z_w)的转换关系式为[19]

$$Z\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{d_x}&0&u_0\\0&\frac{1}{d_y}&v_0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f&0&0&0\\0&f&0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{3\times3}&\boldsymbol{T}_{3\times3}\\0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix}\tag{2}$$

式中 (u,v)——点 P 的像素坐标

d_x、d_y、u_0、v_0——相机内部参数

f——相机焦距

Z——相机与点 P 的竖直距离

$\boldsymbol{R}_{3\times3}$、$\boldsymbol{T}_{3\times3}$——相机相对于空间场景位置和方向的旋转矩阵和平移矩阵

考虑到茶鲜叶生长角度存在差异,在俯视角度下其图像呈现的形状不规则,使目标定位点计算难度增加。本研究通过 YOLO v8s 算法完成茶鲜叶检测,采用最小矩形框包裹识别的茶鲜叶,将矩形框中心点的坐标替代茶鲜叶在像素坐标系下的坐标;同时,基于双目相机的 3D 点云数据,计算对应茶鲜叶中心像素点与双目相机的竖直距离 Z,代入式(2)得到茶鲜叶在世界坐标系中的位置坐标(X_w,Y_w,Z_w)。

2.3.2 理论作业位姿求取

在大宗茶采收作业过程中,采茶机割刀的实际俯仰角 λ_1 通常在 5° ~ 10°的范围内调整,本研究将采茶机的理论俯仰角 λ_2 设定为 7.5°。

根据 ZED2i 型相机的安装位置要求,拍摄图像时的视场角较大,视野内茶鲜叶数量较多,导致相机视野内的茶鲜叶到采茶机距离出现较大起伏,影响理论作业位姿的拟合精度,同时数量过多的茶鲜叶目标会延长理论作业位姿的求解时间,影响控制系统的响应时间。因此,本研究对分辨率为 1 920 像素 ×1 080 像素的输入图像(对应于像素坐标系 $u\times v$)进行区域裁剪,保留茶蓬宽度方向 $u\in[0,1\,920]$,前进方向 $v\in[270,810]$ 的中间区域图像进行茶鲜叶检测、定位。

在茶鲜叶检测过程中,为降低错检率,设置茶鲜叶检测的置信度阈值为 0.5;同时,为避免茶蓬面存

在的少数生长过高或过低的茶鲜叶影响整体的采收质量，选取以茶鲜叶的平均高度为中心，上下各取10%的区域作为有效检测范围，并将区域内离散分布的 n 个检测目标框中心点在世界坐标系 $X_wO_wZ_w$ 平面上投影，得到茶鲜叶目标框中心点投影散点集 $\{(X_{w1},Z_{w1}),(X_{w2},Z_{w2}),\cdots,(X_{wn},Z_{wn})\}$。采用最小二乘法构建拟合茶树行横截面包络线方程为

$$Z_w = aX_w + b \tag{3}$$

式中　a、b——待求系数

定义误差函数 $S(a,b)$，以最小化所有茶鲜叶中心点到拟合直线距离的平方和，其表达式为

$$S(a,b) = \sum_{i=1}^{n} (Z_{wi} - aX_{wi} - b)^2 \tag{4}$$

对式(4)分别关于待定系数 a 和 b 求偏导，并令偏导数均等于零，经整理后得到方程组

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} X_{wi}Z_{wi} = a\sum_{i=1}^{n} X_{wi}^2 + b\sum_{i=1}^{n} X_{wi} = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} Z_{wi} = a\sum_{i=1}^{n} X_{wi} + nb = 0 \end{cases} \tag{5}$$

求解方程组(5)得到待定系数 a、b 的值，将其代入式(3)，得到茶树行横截面包络线拟合方程(见图 7)。图中 H 为预设采收高度，基于采收线即可获得作业高度 Z_{w2}、横滚角 σ_2 等理论采收位姿参数。

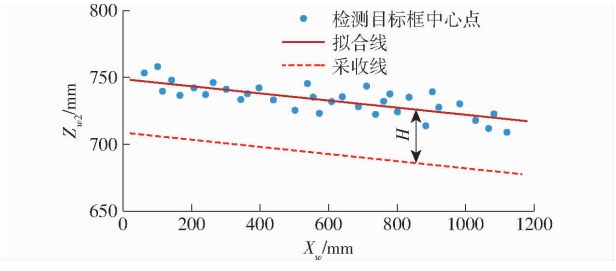


图 7　采收位姿参数解算方程拟合图

Fig. 7　Fitting diagram for harvesting pose parameter solution equation

作业过程中，为避免因理论作业位姿求解频率过高导致采茶机的实际作业姿态难以实时匹配，同时减少对相机视野内茶树蓬面鲜叶的重复检测、定位和理论作业位姿求解的计算量，本研究结合采茶机作业行进速度，设定采收位姿参数解算方程的时间间隔为 0.4 s。

2.4　实际作业位姿控制

采茶机作业位姿调整时，以万向节十字轴中心为坐标原点，分别建立作业前实际作业位姿坐标系 $o_1-i_1j_1k_1$ 和作业后理论作业位姿坐标系 $o_2-i_2j_2k_2$，两坐标系关系如图 8 所示。其中，i_1 轴与采茶机的前进方向一致，坐标系 $o_1-i_1j_1k_1$ 到 $o_2-i_2j_2k_2$ 的转换过程即为作业位姿调整核心，具体通过绕 i_1 轴旋转角度 α，绕 j_1 轴旋转角度 β，沿 k_1 轴移动位移 h 实现。

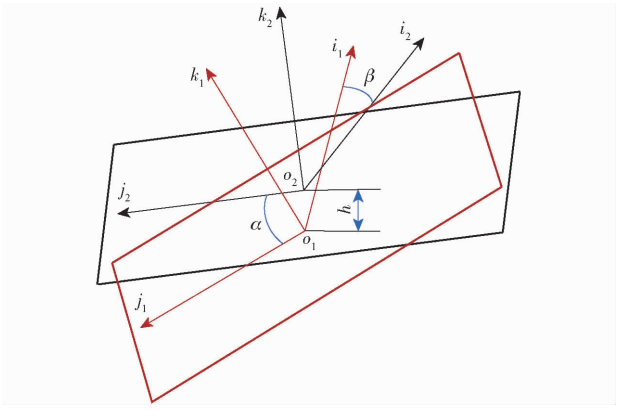


图 8　实际与理论作业位姿坐标系关系图

Fig. 8　Relationship diagram between actual and theoretical working posture coordinate system of cutting blade

闭环控制的阈值设置：横滚角的阈值设置为 ±1.0°；俯仰角的阈值设置为 ±1.0°；高度控制的阈值设置为 ±10.0 mm。若实际作业位姿与理论作业位姿的差值在预设阈值范围外，则控制系统驱动电动推杆进行姿态调整动作。

2.4.1　作业高度调整

基于理论作业高度 Z_{w2}，结合传感器获取当前的实际作业高度 Z_{w1}，直线电缸的动作量计算公式为

$$h = Z_{w2} - Z_{w1} \tag{6}$$

再将该动作量代入

$$h = n'tP = \frac{60\omega tP}{\frac{360}{\theta_n}M} \tag{7}$$

式中　n'——转速

t——运行时间

P——丝杆螺距

ω——微控制器输出的脉冲频率

θ_n——步距角

M——驱动器细分

转换为相应的驱动脉冲进行控制，实现实际作业高度逐步逼近理论作业高度 Z_{w2}。

2.4.2　倾斜角度调整

根据实际横滚角 σ_1、实际俯仰角 λ_1、理论横滚角 σ_2 和理论俯仰角 λ_2，计算实际作业位姿调整后两个电动推杆顶端的位置坐标，公式为

$$\boldsymbol{T}' = \boldsymbol{R}(i_1,\alpha)\boldsymbol{R}(j_1,\beta)\boldsymbol{T} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{R}(i_1,\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{R}(j_1,\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中 $\boldsymbol{T}=[x \quad y \quad z]^{\mathrm{T}}$ $\boldsymbol{T}'=[x' \quad y' \quad z']^{\mathrm{T}}$

$\alpha=\sigma_1-\sigma_2$ $\beta=7.5°-\lambda_1$

式中 $\boldsymbol{T}$——初始电动推杆顶端的位置坐标矩阵

$\boldsymbol{T}'$——作业位姿调整后电动推杆顶端的位置坐标矩阵

$\boldsymbol{R}(i_1,\alpha)$、$\boldsymbol{R}(j_1,\beta)$——绕 i_1 轴、j_1 轴的旋转矩阵

α——实际横滚角与理论横滚角的差值

β——理论俯仰角与实际俯仰角的差值

两个电动推杆的动作量 l 计算公式为

$$l=\sqrt{(\boldsymbol{T}-\boldsymbol{A})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{T}-\boldsymbol{A})}-\sqrt{(\boldsymbol{T}'-\boldsymbol{A})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{T}'-\boldsymbol{A})} \tag{11}$$

其中 $\boldsymbol{A}=[x_0 \quad y_0 \quad z_0]^{\mathrm{T}}$

式中 $\boldsymbol{A}$——电动推杆底部位置坐标矩阵

按式(7)转换为相应脉冲信号进行控制,实现实际作业倾角调整。

3 样机稳定性分析与试验

根据采茶机的三维结构和控制算法,搭建了基于机器视觉的自走悬臂式仿形采茶机,并对控制系统的实时性能进行测试,其平均响应时间为 77.54 ms。

3.1 整机稳定性分析

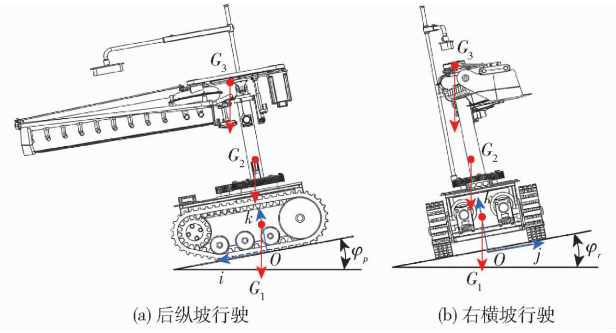
纵向坡地和横向坡地是茶园机械在丘陵山地作业的常见路况。自走悬臂式仿形采茶机采收作业时,工作部位的位置较高,本文分别研究采茶机在转场和作业两种工况下坡道极限翻倾角的变化说明整机的稳定性。为方便分析,将整机分为底盘、位姿调整装置(包括图像采集装置)、茶叶采收装置 3 部分,以履带接触地面面积的中心点为原点对整机建立坐标系 $O-ijk$,其中 i 轴正方向与底盘的前进方向一致。

3.1.1 转场稳定性分析

采茶机转场作业时,需控制直线电缸将茶叶采收装置的作业高度降至最低,并通过轴承驱动茶叶采收装置旋转至纵向状态,以此优化采茶机转场过程中的稳定性与通过性。采茶机在横坡和纵坡路段转场行驶的示意图如图 9 所示。

在整机坐标系 $O-ijk$ 中,履带式底盘的重心坐标为(0,0,0.175) m,质量 112.3 kg;姿态调整装置的重心坐标为(0.057,0,0.485) m,质量 49.9 kg;茶叶采收装置重心坐标为(0.108,-0.083,0.962) m,质量 36.8 kg。整机重心坐标(x_G,y_G,z_G)满足

$$(x_G,y_G,z_G)=\left(\frac{\sum_{m=1}^{3}G_m x_m}{\sum_{m=1}^{3}G_m},\frac{\sum_{m=1}^{3}G_m y_m}{\sum_{m=1}^{3}G_m},\frac{\sum_{m=1}^{3}G_m z_m}{\sum_{m=1}^{3}G_m}\right) \tag{12}$$



(a) 后纵坡行驶 (b) 右横坡行驶

图 9 采茶机转场示意图

Fig. 9 Diagrams of tea-picking machine transition

式中 G_m——各组成部分的重量

(x_m,y_m,z_m)——各组成部分的重心坐标

整机纵向坡路行驶的极限翻倾角 φ_p 为

$$\varphi_p=\arctan\frac{|x_p-x_G|}{z_G} \tag{13}$$

式中 x_p——纵翻时倾覆线的 i 坐标,取 ±0.235

横向坡路行驶的极限翻倾角 φ_r 为

$$\varphi_r=\arctan\frac{|y_r-y_G|}{z_G} \tag{14}$$

式中 y_r——侧翻时倾覆线的 j 坐标,取 ±0.325

求解式(13)、(14)得采茶机转场时,处于后纵坡和前纵坡时的极限纵翻倾角 φ_p 分别为 26.7°、34.1°;左横坡和右横坡时的极限侧翻倾角 φ_r 分别为 40.5°、37.9°。

3.1.2 作业稳定性分析

采茶机采收作业时,需控制位姿调整装置逆时针旋转 90°,使茶叶采收装置转至横向作业姿态,其在横坡和纵坡路段的作业示意图如图 10 所示。

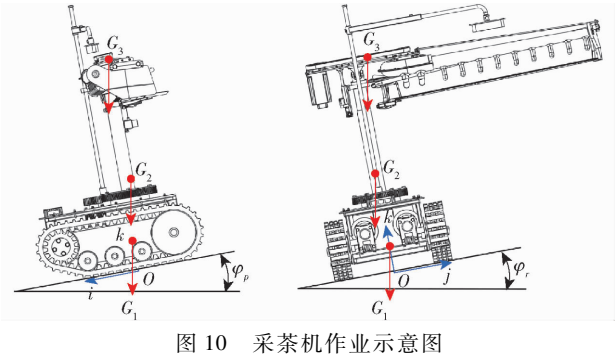


图 10 采茶机作业示意图

Fig. 10 Diagram of tea picking machine operation

在整机坐标系 $O-ijk$ 中,底盘的重心位置始终不变;万向节十字轴中心点 o_1 坐标由结构确定为(0,0.057,0.911) m;姿态调整装置和茶叶采收装置的重心坐标会随采茶机位姿的动态调整而变化,其中姿态调整装置的重心坐标为$(0,0.057,k_z)$ m,$k_z\in[0.485,0.552]$ m,该范围由割刀高度调节区间 Δh 确定,$\Delta h\in[0,0.020]$ m。此外,采茶机会产生自重振动载荷,采用冲击系数 λ 与自重载荷的乘积进

行量化计算，其中 $\lambda \in [0.9, 1.1]$，本文取 $\lambda = 1.1$ 求极限翻倾角[14]。

设茶叶采收装置的重心在坐标系 $o-i_2j_2k_2$、$O-ijk$ 中的坐标分别为 (x_{23}, y_{23}, z_{23})、(x_3, y_3, z_3)，其中 (x_{23}, y_{23}, z_{23}) 由坐标系 $O-ijk$ 下的茶叶采收装置重心坐标和点 o_1 坐标推导确定，为 (0.083, 0.051, 0.051) m。茶叶采收装置的重心坐标 (x_3, y_3, z_3) 可根据点 o_1 坐标和式(9)、(10)表示为

$$(x_3, y_3, z_3)^{\mathrm{T}} = (0, 0.057, 0.911)^{\mathrm{T}} + (0, 0, \Delta h)^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}(i_2, \alpha)\boldsymbol{R}(j_2, \beta)(x_{23}, y_{23}, z_{23})^{\mathrm{T}} \quad (15)$$

其中，Δh 为茶叶采收装置行程，$\alpha \in [-5°, 5°]$，$\beta \in [5°, 10°]$。

将式(15)的计算结果代入式(12)可得作业状态下的整机重心坐标，具体为

$$\begin{cases} x_G \in [0.0135 \quad 0.0144]\,\mathrm{m} \\ y_G \in [0.0332 \quad 0.0352]\,\mathrm{m} \\ z_G \in [0.3986\,\mathrm{m} + 0.269\Delta h \quad 0.4016\,\mathrm{m} + 0.269\Delta h] \end{cases}$$

由茶叶采收装置重心坐标的区间值可知，其重心位置受倾斜角度的影响较小，故采用该坐标区间值的平均值 $(\bar{x}_G, \bar{y}_G, \bar{z}_G) = (0.014\ \mathrm{m}, 0.034\ \mathrm{m}, 0.400\ \mathrm{m} + 0.269\Delta h)$ 进行等效替代。以茶叶采收装置的行程 Δh 为变量，分析其对极限翻倾角的影响规律，结果如图 11 所示。

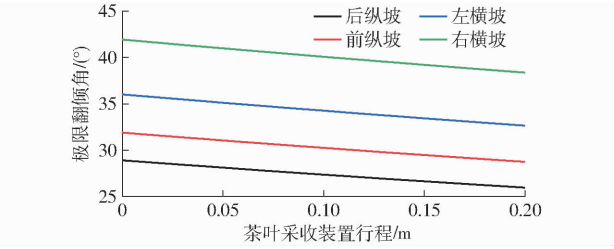


图 11　采茶机作业极限翻倾角变化曲线

Fig. 11　Variation curves of maximum overturning angle of tea-picking machine

采茶机在纵坡与横坡作业工况下，随着茶叶采收装置行程 Δh 的增大，各向极限倾翻角均呈下降趋势。其中，后纵坡和前纵坡作业时的极限翻倾角变化范围分别为 $\varphi_{p1} \in [26.0°, 28.9°]$ 和 $\varphi_{p2} \in [28.8°, 32.0°]$；左横坡和右横坡作业时的极限翻倾角变化范围分别为 $\varphi_{r1} \in [32.7°, 36.0°]$ 和 $\varphi_{r2} \in [38.4°, 41.9°]$。

结合山区人工道路的实际通行条件和茶园机械化作业的适宜坡度要求，两类场景的路面坡度通常不超过 15°。该数值远小于采茶机在转场及作业两种工况下的坡道极限翻倾角，充分表明该采茶机在山区复杂地形的转场通行与田间采收作业过程中，均具备良好的行驶稳定性与作业安全性，能够满足实际工况需求。

3.2　试验结果与分析

2024 年 8 月在陕西省商洛市商南县茶园进行采茶机仿形性能试验和大宗茶鲜叶采收试验，如图 12 所示。



图 12　仿形测试与大宗茶鲜叶采收试验

Fig. 12　Prototype dynamic performance testing and bulk tea fresh leaf harvesting experiment

试验选用茶树品种为龙井 43，根据茶园采收规范，确定采收部位为一芽四叶及以下芽叶，茶鲜叶的采收长度 H 为 45 ~ 65 mm，确定 H 为 55 mm。通过遥控履带式底盘驱动采茶机驶入茶园，控制轴承驱动茶叶采收装置由纵向回转至横向作业姿态。在茶园选取 3 行茶树作为试验对象，启动控制系统后，采茶机以 0.3m/s 的平均速度沿茶树垄长方向行进约 10 m，依靠鼓风口产生的风力将茶鲜叶收集至收集袋，用于大宗茶采收试验的质量分析。

试验过程中实时保存理论作业位姿与实际作业位姿数据，并对数据进行对比分析，结果如图 13、表 2 所示。

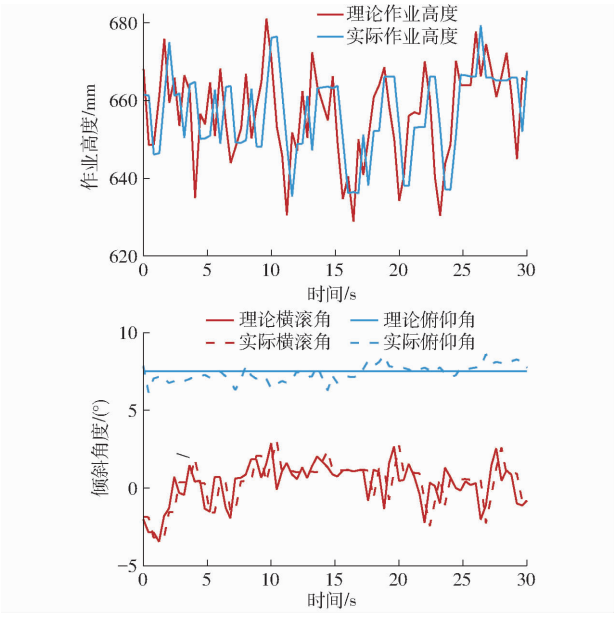


图 13　位姿数据分析

Fig. 13　Analysis of posture data

由图表可知，实际作业高度和理论作业高度、实际横滚角和理论横滚角的变化趋势基本一致，表明采茶机的实际作业位姿可以实现对理论作业位姿的实时跟随调整；但受控制系统响应时间的影响，实际

表 2 仿形试验数据统计结果

Tab. 2 Calculation of imitation test data

作业位姿参数	均值	标准差	极差	均方根误差	平均绝对误差
理论作业高度/mm	657.66	12.00	52.10	12.49	10.38
实际作业高度/mm	657.64	11.02	44.04		
实际俯仰角/(°)	7.42	0.51	2.46	0.54	0.48
理论横滚角/(°)	0.27	1.30	6.32	1.27	0.98
实际横滚角/(°)	0.31	1.35	6.22		

作业位姿调整存在一定滞后现象;实际俯仰角波动幅度较小,表明在仿形试验过程中茶树行间地面平整度良好,整机行驶状态稳定。同时,当理论作业位姿出现较小或较大幅度变化时,由于直线电缸和电动推杆的动作速度与理论作业位姿的变化速率不匹配,实际作业位姿调整存在超调或欠调的现象。因此,对于茶树蓬面的高度、倾斜角度变化较大的茶垄,可以通过降低采茶机行驶速度的方式,提升仿形效果和采收质量。综上,采茶机仿形作业过程中的整体误差处于预设控制死区区间内,实际作业位姿能够有效跟随茶树蓬面的倾斜角度和高度的动态变化进行调整。

采用对角线四分法从全部机采鲜叶中提取分析样品,按照 NY/T 2614—2014《采茶机作业质量》,对所采茶鲜叶的完整率 R_1、漏集率 R_2 和漏采率 R_3 进行测定和评估,计算公式为

$$R_1 = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \tag{16}$$

$$R_2 = \frac{m_4}{m_3 + m_4} \times 100\% \tag{17}$$

$$R_3 = \frac{m_5}{m_3 + m_4 + m_5} \times 100\% \tag{18}$$

式中 m_1——样品总质量

m_2——完整茶芽质量

m_3——机采鲜叶质量

m_4——漏集鲜叶质量

m_5——漏采鲜叶质量

结果如表 3 所示,重复 3 次试验。计算得平均芽叶完整率 $\overline{R}_1 = 83.9\%$、平均漏集率 $\overline{R}_2 = 0.74\%$、平均漏采率 $\overline{R}_3 = 0.95\%$。

对一芽一叶、一芽二叶、一芽三叶、一芽四叶及以上芽叶进行分布情况统计,结果如表 4 所示,一芽三叶及以下芽叶占 87.8%。

表 3 所采茶鲜叶各项质量测定结果

Tab. 3 Quality determination for fresh tea leaves collected

g

测次	样品总质量	完整芽叶质量	机采鲜叶质量	漏集鲜叶质量	漏采鲜叶质量
1	100.8	86.2	131.8	1.2	1.3
2	99.5	82.3	117.1	0.9	0.8
3	100.2	83.6	125.4	0.7	1.5

表 4 芽叶分布情况统计结果

Tab. 4 Statistics on distribution of buds and leaves

指标	一芽一叶	一芽二叶	一芽三叶	一芽四叶及以上	总计
质量/g	31.3	95.9	136.7	36.6	300.5
占比/%	10.4	31.9	45.5	12.2	100

4 结论

(1)提出一种基于机器视觉的自走悬臂式仿形采茶机的设计方案,研制了一种适用于平地、缓坡、丘陵地形的电驱动智能仿形采茶机,该装备基于深度学习、机器视觉和嵌入式技术融合开发控制算法,实现茶鲜叶的检测定位和采茶机作业位姿的仿形控制。

(2)通过 ZED2i 型双目立体相机与 YOLO v8s 对茶鲜叶定位后,采用最小二乘法构建采收位姿参数解算方程,求解采茶机理论作业位姿,其中茶鲜叶检测平均准确率为 88.7%;控制直线电缸与电动推杆协同动作调整茶叶采收装置实际作业位姿,并通过多传感器实现对实际作业位姿的精确反馈,保证了采茶机的采收机构与目标采收高度一致,并与被采茶鲜叶之间有良好的切割角度。

(3)整机稳定性分析表明,采茶机转场时前纵坡、后纵坡极限翻倾角分别为 34.1°、26.7°,左横坡、右横坡分别为 40.5°、37.9°;作业工况下各向极限翻倾角均在 26.0°以上,远高于山区人工道路及适宜机械化作业茶园的 15°最大坡度,转场与作业过程均具备良好的稳定性与安全性。

(4)通过开展大宗茶采收试验,所采收茶鲜叶的平均芽叶完整率 83.9%,平均芽叶漏集率 0.74%,平均芽叶漏采率 0.95%,一芽三叶及以下芽叶占 87.8%,满足采茶机作业质量标准。

参 考 文 献

[1] 吴传云, 王建合, 杨瑶, 等. 我国经济作物产业发展现状与机械化趋势分析[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(1): 1 - 13.
Wu Chuanyun, Wang Jianhe, Yang Yao, et al. Analysis of the development status and mechanization trends of economic crop industry in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 1 - 13. (in Chinese)

[2] 郑航, 傅童, 薛向磊, 等. 茶叶机械化采摘技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(9): 28 - 35.

Zheng Hang, Fu Tong, Xue Xianglei, et al. Research status and prospect of tea mechanized picking technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9): 28 - 35. (in Chinese)

[3] 郇晓龙, 高响, 吴敏, 等. 自走式大宗茶蓬面仿形采茶机关键装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 374 - 383.
Huan Xiaolong, Gao Xiang, Wu Min, et al. Design and experiment of key devices for self-propelled bulk tea canopy surface shaping tea picking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 374 - 383. (in Chinese)

[4] 汤一平, 韩旺明, 胡安国, 等. 基于机器视觉的乘用式智能采茶机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 15 - 20.
Tang Yiping, Han Wangming, Hu Anguo, et al. Design and experiment of intelligentized tea-plucking machine for human riding based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 15 - 20. (in Chinese)

[5] 赵润茂, 卞贤炳, 陈建能, 等. 分布控制的乘坐式仿形采茶原型机研制与试验[J]. 茶叶科学, 2022, 42(2): 263 - 276.
Zhao Runmao, Bian Xianbing, Chen Jianneng, et al. Development and test for distributed control prototype of the riding profiling tea harvester[J]. Journal of Tea Science, 2022, 42(2): 263 - 276. (in Chinese)

[6] 吴敏, 郇晓龙, 陈建能, 等. 融合 2D 激光雷达与航向姿态参考系统的采茶机仿形方法研究与试验[J]. 茶叶科学, 2023, 43(1): 135 - 145.
Wu Min,Huan Xiaolong, Chen Jianneng, et al. Research and experiment on profiling method of tea picker based on fusion of 2D-LiDAR and attitude and heading reference system[J]. Journal of Tea Science, 2023, 43(1): 135 - 145. (in Chinese)

[7] 吴正敏, 陈乐, 汪义勇, 等. 履带自走式采茶机行走底盘通过性设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 474 - 483.
Wu Zhengmin, Chen Le, Wang Yiyong, et al. Design and experiment on traversibility of traveling chassis of crawler self-propelled tea picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 474 - 483. (in Chinese)

[8] 傅童. 茶叶自适应仿形采摘装置设计与试验[D]. 杭州: 浙江科技大学, 2024.
Fu Tong. Design and test of tea self-adaptive profiling picking device[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2024. (in Chinese)

[9] 闫晶晶. 仿形采茶机的优化设计及与茶园管理的协调性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
Yan Jingjing. Optimization design of profiling tea picking machine and research on coordination with tea plantation management[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[10] 吴先坤. 履带自走式采茶机的设计与试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
Wu Xiankun. Design and experimental study on self-propelled tea-picking machine[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[11] 韩余, 肖宏儒, 宋志禹, 等. 4CJ - 1200 型跨行自走式采茶机设计与试验[J]. 农业工程技术, 2022, 42(15): 108.
Han Yu, Xiao Hongru, Song Zhiyu, et al. Design and experiment of 4CJ - 1200 cross-row self-propelled tea picking machine[J]. Agricultural Engineering Technology, 2022, 42(15): 108. (in Chinese)

[12] 喻世龙. 割刀自适应调节的采茶机优化设计与试验研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2024.
Yu Shilong. Optimization design and experimental study of tea-plucking machine with adaptive adjustment of cutter[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024. (in Chinese)

[13] Li B, Zhu H, Fang L, et al. Design and experimentation of crawler tea harvesting machine[J]. J. Chin. Inst. Eng., 2024, 47(5): 482 - 491.

[14] 王琪. 一种割刀高度自适应调节的采茶机设计与试验研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022.
Wang Qi. Design and experimental study of a tea picker with adaptive adjustment of cutter height[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022. (in Chinese)

[15] 蔡舒平, 潘文浩, 刘慧, 等. 基于 D2 - YOLO 去模糊识别网络的果园障碍物检测[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 284 - 292.
Cai Shuping, Pan Wenhao, Liu Hui, et al. Orchard obstacle detection based on D2 - YOLO deblurring recognition network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 284 - 292. (in Chinese)

[16] 陈斌, 张漫, 徐弘祯, 等. 基于改进 YOLO v3 - tiny 的全景图像农田障碍物检测[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊 1): 58 - 65.
Chen Bin, Zhang Man,Xu Hongzhen, et al. Farmland obstacle detection in panoramic image based on improved YOLO v3 - tiny[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(S1): 58 - 65. (in Chinese)

[17] 翟长远, 付豪, 郑康, 等. 基于深度学习的大田甘蓝在线识别模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 293 - 303.
Zhai Changyuan, Fu Hao, Zheng Kang, et al. Establishment and experimental verification of deep learning model for on-line recognition of field cabbage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 293 - 303. (in Chinese)

[18] 蔡连江. 棚架葡萄高速切接采收机器人设计与试验[D]. 镇江: 江苏大学, 2024.

Cai Lianjiang. Design and experiment of a high-speed cut-and-catch harvesting robot for trellis grape[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024. (in Chinese)

[19] 宋昊,张学敏,谢鹏飞,等. 西兰花选择性采收作业平台识别切割装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(1):68-79.
Song Hao, Zhang Xuemin, Xie Pengfei, et al. Design and experiment of the identification cutting devices for a selective harvesting platform of broccoli[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 68-79. (in Chinese)

[20] 马义东,冯腾潇,金鑫,等. 水培生菜低损采收柔性抓取参数视觉检测方法[J]. 农业机械学报,2025,56(7):210-218.
Ma Yidong, Feng Tengxiao, Jin Xin, et al. Visual detection method of flexible grasping parameters for hydroponic lettuce low-damage harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 210-218. (in Chinese)

[21] Li R, Li Y, Qin W, et al. Lightweight network for corn leaf disease identification based on improved YOLO v8s[J]. Agriculture, 2024, 14(2): 17.

[22] Lin Y, Huang Z, Liang Y. AG-YOLO: a rapid citrus fruit detection algorithm with global context fusion[J]. Agriculture, 2024, 14(1): 15.

[23] Liu Z, Xiong J, Cai M, et al. V-YOLO: a lightweight and efficient detection model for guava in complex orchard environments[J]. Agronomy, 2024, 14(9): 16.

[24] Nan Y, Zhang H, Zeng Y, et al. Intelligent detection of multi-class pitaya fruits in target picking row based on WGB-YOLO network[J]. Comput. Electron. Agric., 2023, 208:15.

[25] 黄家才, 唐安, 陈光明, 等. 基于 Compact-YOLO v4 的茶叶嫩芽移动端识别方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 282-290.
Huang Jiacai, Tang An, Chen Guangming, et al. Mobile recognition solution of tea buds based on Compact-YOLO v4 algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 282-290. (in Chinese)

[26] 王春桃, 谢伟斌, 肖德琴. 基于 YOLO-SVP 的小尺寸蔬菜害虫检测模型研究[J]. 农业机械学报, 2026,57(5):364-372.
Wang Chuntao, Xie Weibin, Xiao Deqin. Detection model for small-sized vegetable pests based on YOLO-SVP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(5):364-372. (in Chinese)

[27] Kuznetsova A, Maleva T, Soloviev V. Using YOLOv3 algorithm with pre- and post-processing for apple detection in fruit-harvesting robot[J]. Agronomy, 2020, 10(7): 19.

[28] Wei M, Zhan W. YOLO_MRC: a fast and lightweight model for real-time detection and ind ividual counting of tephritidae pests[J]. Ecol. Inform., 2024, 79: 15.

[29] Dong S, Teng Y, Jiao L, et al. ESA-Net: an efficient scale-aware network for small crop pest detection[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 236: 121308.

[30] Lu Y, Li D, Li D, et al. A lightweight insulator defect detection model based on drone images[J]. Drones, 2024, 8(9): 431.

[31] Li Y, Wu S, He L, et al. Development and field evaluation of a robotic harvesting system for plucking high-quality tea[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107659.

[32] 扈凯, 张文毅, 李坤, 等. 高地隙三角履带底盘多体动力学建模与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 386-394.
Hu Kai, Zhang Wenyi, Li Kun, et al. Multi-body dynamics modeling and experiment of triangular tracked chassis with high ground clearance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 386-394. (in Chinese)