doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.033

基于双模态与模糊自适应 PID 控制的甘蔗收获机切梢器智能定位系统研究

李尚平[1,2]　任泓宇[1,2]　莫一凡[1,2]　韦雨彤[1,2]　文春明[1,2]　李凯华[3]

(1.广西民族大学电子信息学院,南宁 530006;2.广西高校智慧无人系统与智能装备重点实验室,南宁 530006;
3.南宁钛银科技有限公司,南宁 530103)

摘要:为解决甘蔗收获机驾驶员依赖肉眼和经验判断蔗梢位置,难以实时精准调整切割高度的问题,提出了一种基于双模态及模糊自适应 PID 控制的甘蔗收获机切梢器智能定位系统,并提出了基于甘蔗簇特征识别的簇调刀策略。系统首先利用 YOLO v8 实例分割模型检测蔗梢,深度相机实时采集甘蔗蔗梢的深度数据,并将像素坐标转换为相机坐标,实现高度测量,为验证深度相机在田间的实际定位效果,设计了多组田间甘蔗定位试验,结果显示,深度相机在距离甘蔗 50~100 cm 范围内的平均相对误差为 0.189%~0.949%。随后,通过设计模糊规则,单片机结合模糊自适应 PID 算法,上升响应速度约为 289.36 mm/s,下降响应速度约为 273.16 mm/s,误差在 ±1 mm 内。PID 对比试验表明,模糊 PID 控制相较于传统 PID 控制,模糊 PID 响应时间缩短了 0.12 s,为 1.24 s,超调量由 12.80 mm 减少至 4.63 mm,超调次数降至 1 次,稳态误差稳定在 ±2 mm 以内。最后,动态试验表明,系统的平均识别时间为 0.08 s,具有良好的实时性。

关键词:甘蔗收获机;切梢器;智能定位系统;模糊自适应 PID 控制;双模态

中图分类号:S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0366-10　　**OSID**:

Intelligent Positioning System of Sugarcane Harvester Tip Cutter Based on Bimodal and Fuzzy Adaptive PID Control

LI Shangping[1,2]　REN Hongyu[1,2]　MO Yifan[1,2]　WEI Yutong[1,2]　WEN Chunming[1,2]　LI Kaihua[3]

(1. *College of Electronic Information*, *Guangxi Minzu University*, *Nanning* 530006, *China*
2. *Key Laboratory of Intelligent Unmanned System and Intelligent Equipment*, *Nanning* 530006, *China*
3. *Nanning Taiying Technology Co.*, *Ltd.*, *Nanning* 530103, *China*)

Abstract: Aiming to address the challenge faced by sugarcane harvester operators who rely solely on visual judgment and experience to determine cane tops' positions, making it difficult to adjust cutting height accurately and in real-time, an intelligent positioning system for sugarcane harvester top cutters was proposed based on dual-modal and fuzzy adaptive PID control. Additionally, a cluster-based knife adjustment strategy was developed based on sugarcane cluster feature recognition. The system firstly utilized the YOLO v8 instance segmentation model to detect cane tops, with a depth camera capturing depth data of sugarcane tops in real time and converting pixel coordinates into camera coordinates for height measurement. To validate the depth camera's field performance, multiple field experiments were conducted. Results showed that within a range of 50~100 cm from the sugarcane, the average relative error of the depth camera ranged from 0.189% to 0.949%. Subsequently, fuzzy rules were designed, and a microcontroller integrated with a fuzzy adaptive PID algorithm was used to control the servo motor's operating speed. The maximum rising response speed was approximately 289.36 mm/s, and the descending response speed was about 273.16 mm, with a measurement error within ±1 mm. PID comparison experiments showed that fuzzy PID control, compared with traditional PID control, reduced the response time by 0.12 s, bringing it down to 1.24 s. The overshoot was decreased from 12.80 mm to

收稿日期:2025-01-14　修回日期:2025-03-26

基金项目:广西民族大学科研项目(302210506)和广西科技重大专项(桂科 AA22117006)

作者简介:李尚平(1956—),男,教授,博士,主要从事智能制造技术信息化研究,E-mail:spli501@vip.sina.com

通信作者:李凯华(1985—),男,实验师,主要从事农业机械自动化研究,E-mail:78281062@qq.com

4.63 mm, the number of overshoots dropped to one, and the steady-state error stabilized within ±2 mm. Finally, dynamic tests demonstrated that the system's average recognition time was 0.08 s, showcasing excellent real-time performance.

Key words: sugarcane harvester; tip cutter; intelligent positioning system; fuzzy adaptive PID control; dual-modal

0　引言

甘蔗是我国重要的战略经济作物，广西地区的甘蔗种植面积占全国总面积的 70%。甘蔗的收获方式主要分为人工收获和机械收获，机械收获又分为整秆式收获、切断式联合收获和分布式收获。虽然人工收获具有较高的精度，但其速度较慢且人工成本较高。相比之下，机械收获效率更高，但受制于技术和设备的限制，导致甘蔗收获后的含杂率较高，难以满足糖厂对原料甘蔗的要求[1]。推进甘蔗机收、提高机收率是提高甘蔗产业竞争力的重要途径；但我国甘蔗机收推进缓慢，2023 年我国甘蔗联合机收率仅 3.4%，这成为制约甘蔗全程机械化推广的主要障碍[2-3]。

甘蔗机械化收获面临的一个主要问题是含杂率较高，而切梢位置的准确性是影响含杂率的主要因素。甘蔗收获机速度较快，驾驶员难以及时调整至合适的切割位置，导致切割位置的随意性较大，直接影响原料蔗的质量。为了解决这一问题，计算机视觉技术被引入农业生产中[4-5]，在复杂田间环境下优化了对蔗梢分叉点的检测，通过统计，甘蔗生长点距离蔗梢 30 ~ 35 cm，并使用双目相机对蔗梢分叉点高度定位，以间接确定甘蔗生长点的高度。WEN 等[5]通过对齐深度图像和 RGB 图像，结合图像处理技术，测量甘蔗顶端切割位置的高度。

目前对甘蔗收获机的切梢装置研究较少。麻芳兰等[6]对蔗梢在榨糖过程中会降低甘蔗的出糖率，以及蔗梢部分进入甘蔗收获机物流系统不利于物流系统的正常运转、堵塞物流通道等问题，在原有物理样机上加装切梢装置。宫元娟等[7]设计了一种用于甘蔗收获机割台的随动控制系统。目的是解决国内甘蔗收获机在田间作业中割台高度无法自动调节的问题。ZHOU 等[8]针对甘蔗收获机实时喂入量监测系统进行了设计与开发，以期在指导收获作业和提高作业效率方面发挥重要作用。研究结合先进的降噪和机器学习技术，实现了对喂入量的精准预测。

在农机控制系统中，PID 算法凭借其简单易用、鲁棒性强的特点，成为控制精度要求较高的场景中广泛采用的方法[9-11]。

目前甘蔗收获机的切梢器高度通过液压缸来调整，速度较为缓慢，并且蔗梢位置主要依赖驾驶员的肉眼和经验判断，难以在作业中实时精准地切割到蔗梢位置，导致机收含杂率较高。为此本文提出一种基于双模态及模糊自适应 PID 的切梢器高度智能定位系统。系统采用 YOLO v8 实例分割算法对蔗梢进行精准检测，并结合奥比中光 Gemini 2 深度相机完成蔗梢高度定位。在切梢提升机构中增加二级提升装置，通过 STM32 单片机控制伺服电机转速带动丝杆滑台实现对切梢器高度的精准调整。

1　切梢器智能定位系统设计与工作原理

1.1　切梢器智能定位系统结构组成与工作原理

南宁钛银科技有限公司 4GL-1 型整秆式甘蔗收获机结构如图 1 所示，其切梢器高度调整系统由液压缸、液压马达和切梢器组成。目前，甘蔗收获机通过液压缸来调整切梢器高度，但调整速度较为缓慢。此外，驾驶员仅能通过肉眼和经验在驾驶室中判断蔗梢位置，在实际作业过程中难以实时、精准地调整切割位置，从而影响切割精度。



图 1　小型整秆式甘蔗收获机

Fig. 1　Diagram of small whole-stalk sugarcane harvester

为了解决这一问题，本文提出一种切梢器高度智能控制系统，图 2 为切梢器高度智能控制系统结构图。该系统主要由伺服电机、步进电机、相机支撑臂、液压马达、深度相机及云台、支撑柱、刀盘支撑架、刀盘、拢蔗杆和支撑液压缸组成。切梢器部分由刀盘及刀盘支撑架构成，其安装架通过支撑柱与甘蔗收获机铰链连接。识别部分由步进电机、相机支撑臂、深度相机及云台组成。深度相机安装在切梢器前方，在实际测试中，该位置所捕捉的图像中，灰尘不会对画面质量产生明显影响。

该系统包括识别定位系统和控制系统。在识别定位系统中，系统通过深度相机结合 YOLO v8 实例分割算法，实现蔗梢分叉点的识别与高度测量。

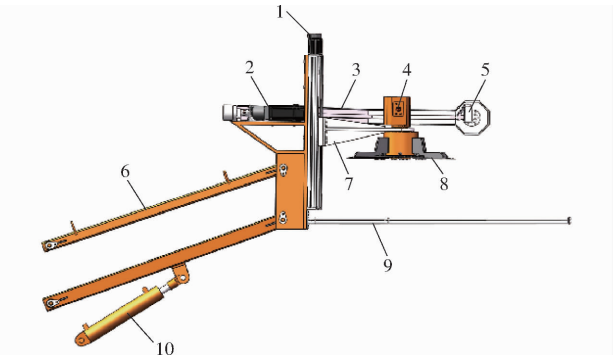

图 2 甘蔗收获机切梢器高度智能控制系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of intelligent height control system for cane harvester topping mechanism

1. 伺服电机 2. 步进电机 3. 相机支撑臂 4. 液压马达 5. 深度相机及云台 6. 支撑柱 7. 刀盘支撑架 8. 刀盘 9. 拢蔗杆 10. 支撑液压缸

在控制系统中,STM32 单片机通过控制伺服电机的运行,实现对丝杆滑台的动态调节,从而调整切梢器的高度。

1.2 切梢范围统计分析

为研究切梢器升降范围,本研究通过田间采样调查对甘蔗蔗梢的高度分布进行了分析,结果如图 3 所示,中蔗 9 号的蔗梢平均高度的分布密度平均值为 294.37 cm,其 1 个标准差范围为 ±27.82 cm,约占统计数据的 68%,2 个标准差范围为 ±55.64 cm,约占统计数据的 95%,3 个标准差范围为 ±83.46 cm,约占统计数据的 99.7%。中蔗福农 44 号的蔗梢平均高度分布密度平均值为 260.91 cm,其 1 个标准差范围约为 ±21.41 cm,约占统计数据的 68%,2 个标准差范围为 ±45.312 cm,约占统计数据的 95%,3 个标准差范围为 ±63.23 cm,约占统计数据的 99.7%。

在切梢装置初调高度后,由于液压缸的调整速度较慢,需要合理确定调刀区间。通过分析蔗梢高度分布,将调刀区间设置在 ±30 cm 范围内,可覆盖两个甘蔗品种中 74.77% 和 83.33% 的蔗梢高度。

对于超出 ±30 cm 范围的蔗梢,主要包括两种情况:未成熟甘蔗,其含糖量远低于成熟甘蔗;高度超出范围的甘蔗,虽然含糖量较高,但数量较少,整体含糖量不如主要部分。因此,为收获少量特殊甘蔗而牺牲大部分成熟甘蔗的意义不大。

综合考虑作业效率和甘蔗质量,最终将调刀区间设定在 ±30 cm 内。为了满足该范围的调整需求,切梢装置采用丝杆滑台,滑台的行程选定为 60 cm。这样的设计能够在不影响主要收获部分的情况下最大限度地提升作业效率,确保收获质量。

2 基于双模态的蔗梢高度估计

蔗梢识别系统是视觉模态和深度模态的结合。视觉模态利用 YOLO v8 实例分割算法对蔗梢分叉点进行精准检测,深度模态通过深度相机测量蔗梢高度,实现三维空间定位。

2.1 基于视觉模态的 YOLO v8 蔗梢检测模型

YOLO(You Only Look Once)系列算法是一种物体检测识别智能算法,具有检测速度快和准确度高的优点[12]。YOLO v8 - Seg 是 YOLO v8 的实例分割模型。与传统物体检测模型相比,实例分割模型在 head 部分增加了原型掩码分支和掩码系数,用于生

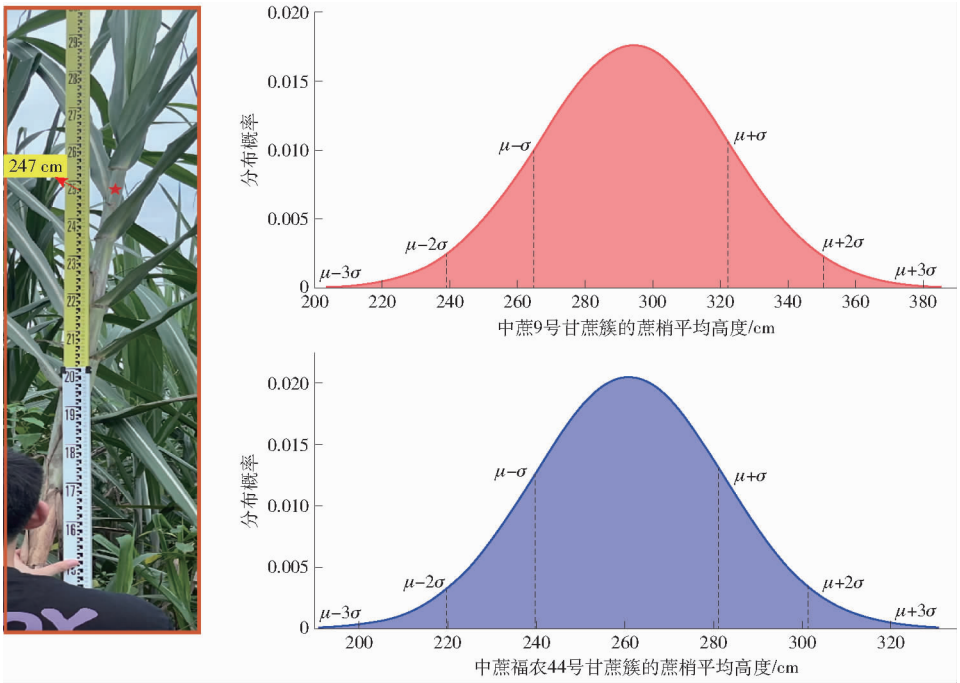

图 3 蔗梢高度正态分布图

Fig. 3 Normal distribution of cane tip height

成实例掩码[13]，这一方法由 YOLACT 提出。鉴于需要在甘蔗收获机上部署，本文选择了最小的模型 YOLO v8n－Seg 用于蔗梢的检测。

2.2　基于深度模态的蔗梢高度估计

本文使用奥比中光 Gemini 2 深度相机作为识别与定位的硬件设备，Gemini 2 使用双目结构光技术实时获取深度信息，并通过算法将深度图像与彩色图像进行匹配，若想获取目标点的相对高度，需要建立相机坐标系。

使用 OrbbecViewer 上位机对 Gemini 2 深度相机进行标定。内参包括：焦距 f_x 为 690.98 像素、f_y 为 690.91 像素、主点坐标 c_x 为 638.98 像素、c_y 为 357.83 像素。

当本文模型识别到蔗梢后（如图 4），可获取识别到的蔗梢掩码的最低点像素坐标 (u_x, v_y)。深度相机获取该像素点对应的深度值 Z_c，该深度表示从相机到目标物体的距离。将像素坐标 (u_x, v_y) 转换为相机坐标系中的三维坐标 $(X_c, -Y_c, Z_c)$，具体公式为

$$X_c = \frac{(u_x - c_x) Z_c}{f_x} \tag{1}$$

$$Y_c = \frac{(v_y - c_y) Z_c}{f_y} \tag{2}$$

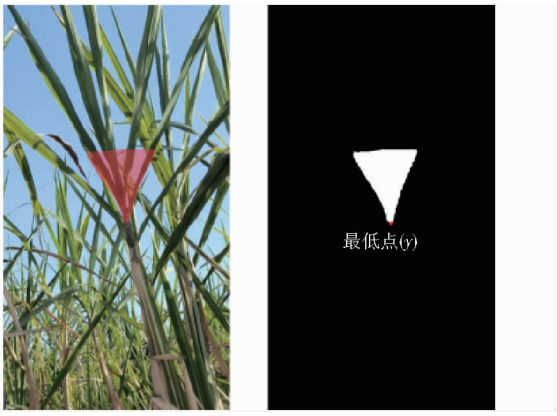

图 4　蔗梢掩码的最低点示意图

Fig. 4　Illustration of the lowest point of sugarcane top mask

相机坐标系的建立如图 5 所示，以相机的焦点为原点，以光轴为 Z 轴建立三维直角坐标系，X 轴和 Y 轴方向与图像坐标系的 x 轴和 y 轴方向吻合。获取目标点 (X_c, Y_c, Z_c)，X_c 是相对于相机的水平偏移量，如果 X_c 为正数，则该点在相机的右侧，如果 X_c 为负数，则该点在相机的左侧；Y_c 表示该点相对于相机的垂直偏移量，如果 Y_c 为正数，则该点在相机的下方，如果 Y_c 是负数则该点在相机的上方，Z_c 表示点距离相机的远近。由于相机坐标系的 Y 轴是垂直向下，因此在测量目标时，实际高度应取相反数作为真实测量值，即 $(X_c, -Y_c, Z_c)$。测量目标的相对高度为 $-Y_c$，绝对高度为 $-Y_c$ 加上相机安装高度。

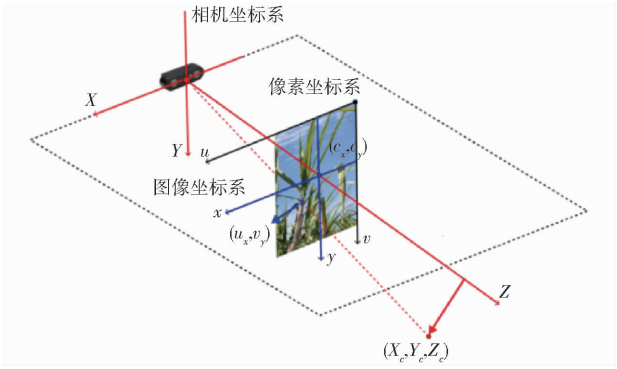

图 5　像素坐标系向相机坐标系转换图

Fig. 5　Conversion from pixel coordinates to camera coordinates

蔗梢识别的关键特征为蔗梢的分叉特征，这是甘蔗收获过程中参考特征，而切割位置需位于甘蔗的生长点。根据统计，甘蔗生长点距离分叉点下约 35 cm，因此系统通过深度相机测量分叉点高度后，减去 35 cm 计算得到切割点位置。

3　多簇控制策略

3.1　甘蔗簇的蔗梢高度统计分析

鉴于甘蔗以簇形式生长，本文通过对甘蔗簇特征进行识别，并将每簇甘蔗蔗梢的高度取平均值输出，以便甘蔗收获机调整切梢器高度，提高甘蔗收获效率。为此，本文对第 2 年宿根蔗的甘蔗簇内最大距离进行了统计分析。不同品种甘蔗簇内最大距离的统计结果如图 6 所示，中蔗 9 号簇内最大距离的分布密度主要集中在 20.59 cm，其 1 个标准差约为 ±3.36 cm，约占统计数据的 68%。2 个标准差范围为 ±6.72 cm，约占统计数据的 95%，3 个标准差范围为 ±10.8 cm，约占统计数据的 99.7%。而中蔗福农 44 号簇内最大距离的分布密度主要集中在 19.6 cm，其 1 个标准差约为 ±3.31 cm，分布特性与中蔗 9 号相似。统计分析表明，这两个品种的簇内距离大部分在 27 cm 以内。

3.2　基于甘蔗簇特征识别的控制策略

为了提高甘蔗收获效率并应对切梢器调整速度较慢的问题，本文提出了一种基于甘蔗簇特征识别的控制策略。甘蔗通常以簇的形式生长，并且簇内蔗梢之间的距离大多数小于 27 cm，而簇与簇之间的距离在 30～40 cm。

为了解决多根甘蔗同时被识别的情况，本文进一步采用深度优先搜索（DFS）算法对甘蔗簇进行分组。首先，系统通过相机和深度相机获取甘蔗蔗梢的三维坐标 $(X_c, -Y_c, Z_c)$，并将这些坐标存储在数组中。接着，设定一个距离阈值 27 cm，使用 pdist

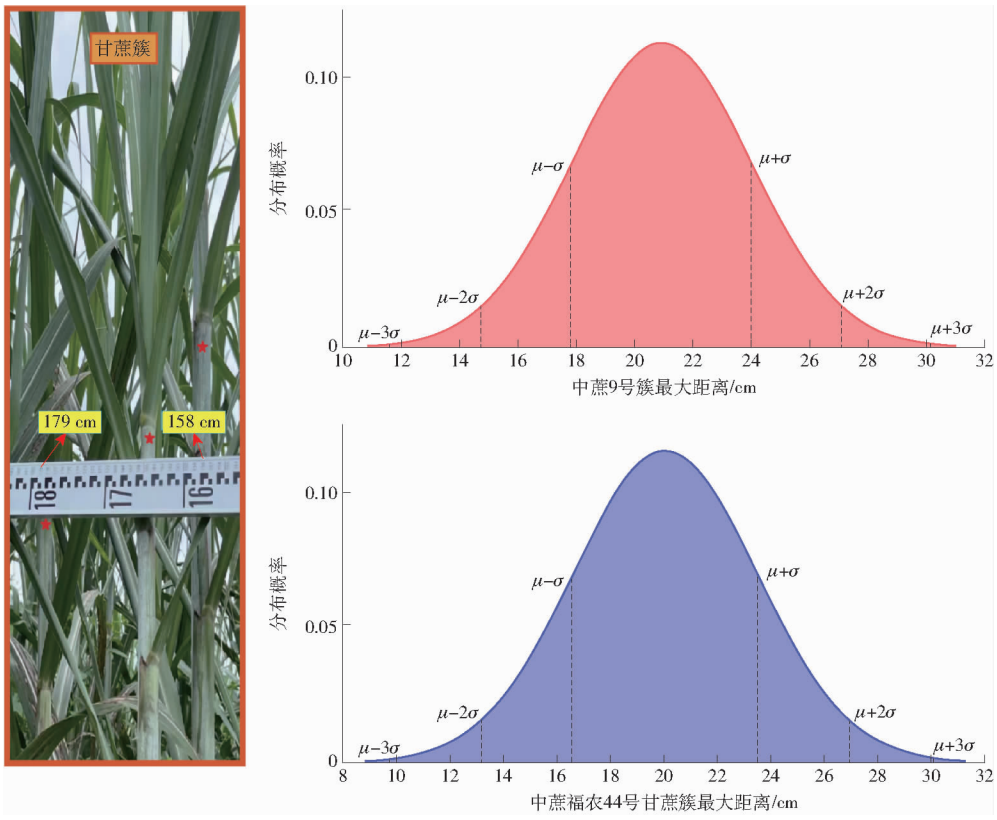

图 6 簇内最大距离分布

Fig. 6 Maximum distance distribution within a cluster

函数计算每对甘蔗之间的水平距离,并将生成的距离向量通过 squareform 函数转化为距离矩阵。通过 DFS 算法遍历距离矩阵,系统将距离小于 27 cm 的甘蔗蔗梢归为同一簇,并根据每簇的所有蔗梢的坐标(X_c, $-Y_c$, Z_c)求得平均值,作为该簇的三维坐标。

甘蔗收获机的作业识别过程如图 7 所示,系统通常会同时识别到多簇甘蔗。系统实时识别每簇的蔗梢平均分叉点位置,并根据其相对位置来判断切割的优先级。首先,记录每簇的 X 坐标和 Y 坐标,并根据 X 坐标选择距离切梢器最近的簇进行优先切割。这样可以确保系统在进行切割时,优先处理离收获机最近的目标点,从而优化作业效率。一旦当前簇的甘蔗切割完成,系统将重新评估当前画面中的所有目标点,并更新优先级,选择距离切梢器最近的簇进行下一步切割。通过这种动态优先级更新策略,系统能够实时适应田间环境的变化,并持续优化切割过程,确保作业的高效性和精确度。

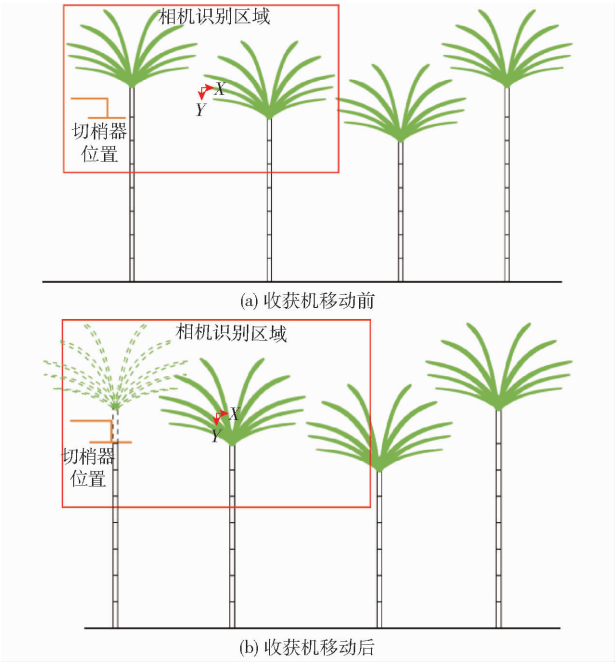

图 7 收获机收获过程中识别示意图

Fig. 7 Schematic of harvester recognition process

4 基于模糊 PID 的切梢器智能定位控制系统

模糊 PID 切梢器智能定位控制系统结构如图 8 所示,深度相机实时采集甘蔗蔗梢的三维空间高度数据,并计算当前切梢器位移与目标切梢高度之间的偏差 e。模糊 PID 控制器将偏差 e 和偏差变化率 e_c 作为输入变量,经过模糊推理和 PID 参数自适应调整,动态调节伺服电机的转速。随着切梢器位移逐渐接近目标高度,伺服电机转速逐步减小,最终实现对目标位置的精确控制。

4.1 模糊控制原理

在切梢器高度调节中,由于甘蔗田间环境复杂、

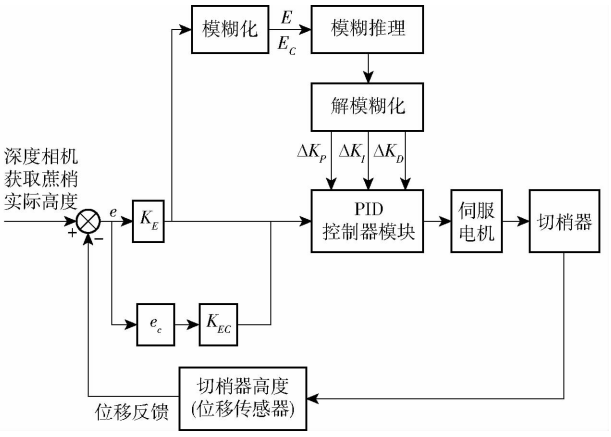

图 8　模糊 PID 切梢器智能定位控制系统结构框图

Fig. 8　Block diagram of intelligent positioning control system for a fuzzy PID tip cutter

蔗梢高度分布存在随机性，传统 PID 控制在参数固定的情况下，难以适应动态环境的变化需求，可能导致超调、振荡或响应滞后[14-16]。而模糊 PID 控制可以根据控制经验和规则，对复杂系统的动态行为进行推理和调整，因此成为切梢器高度调节的有效解决方案。

在切梢器高度控制中，模糊控制器以切梢器高度偏差 e 和偏差变化率 e_c 为输入，通过模糊推理生成伺服电机的控制参数修正量 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D，实时调整伺服电机的转速，使切梢器能够快速接近目标高度并保持稳定。

4.2　模糊控制器设计

模糊 PID 控制器的输入变量包括切梢器高度偏差 e 和切梢器高度偏差变化率 e_c。输出变量包括 PID 参数修正量 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D。其中，输入变量 e、e_c 和输出变量 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 的可行区间如表 1 所示。

表 1　模糊 PID 算法参数设置

Tab. 1　Parameter settings for fuzzy PID algorithm

参数	基本论域	量化因子	模糊子集
e	[-3 mm,3 mm]	1	{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}
e_c	[-2 mm/s,2 mm/s]	3	
ΔK_P	[-0.9,0.9]	1.5	
ΔK_I	[-0.01,0.01]	1.5	
ΔK_D	[-0.2,0.2]	1.5	

根据 PID 参数调整原则及甘蔗收获机切梢器实际调节过程和经验[17-18]，建立模糊控制规则，模糊控制规则如表 2 所示，为调高控制精度，将变量等级划分为 7 级，分别为 NB（负大）、NM（负中）、NS（负小）、ZO（零）、PS（正小）、PM（正中）、PB（正大）。描述输入偏差和偏差变化率对输出参数修正量的影响关系。当偏差 e 较大时，伺服电机的控制量应迅速增大以快速逼近目标高度；当偏差变化率 e_c 较大时，控制量调整应趋于平缓以避免系统振荡。

表 2　模糊控制规则

Tab. 2　Fuzzy control rule

参数	e_c	e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
K_P	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO
	NM	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
	NS	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
	ZO	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	PS	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
	PM	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM
	PB	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB
K_I	NB	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
	NM	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB
	NS	NS	NS	NM	NM	NB	NB	NB
	ZO	NS	NS	ZO	ZO	ZO	NS	NS
	PS	NS	ZO	ZO	ZO	ZO	NS	NS
	PM	ZO	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS
	PB	ZO	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS
K_D	NB	PS	PM	PB	PB	PB	PM	PS
	NM	ZO	PS	PM	PM	PM	PS	ZO
	NS	NS	ZO	PS	PS	PS	ZO	NS
	ZO	NM	NS	ZO	ZO	ZO	NS	NM
	PS	NB	NM	NS	ZO	ZO	ZO	NS
	PM	NB	NB	NM	NS	NS	NS	ZO
	PB	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO

当偏差 e 为正中值且偏差变化率 e_c 较小时，伺服电机转速应适度提高以迅速接近目标高度；当偏差 e 较小时（NS）且偏差变化率 e_c 接近零，伺服电机转速应降低以实现平稳调整。模糊推理的结果经过逆模糊化处理后，生成 PID 控制器的参数修正量。

4.3　控制系统总体设计

本设计的控制系统旨在实现甘蔗收获机切梢器的智能定位和精准控制。通过深度相机和拉线位移传感器获取实时高度信息，结合 STM32 单片机进行逻辑控制，利用模糊 PID 算法动态调整切梢器的高度，以保证切割操作的精确性和高效性。系统整体如图 9 所示，包括奥比中光深度相机 Gemini 2、Jetson Orin NX、STM32F103ZET6 单片机、RS485 转 TTL 模块、拉线位移传感器、伺服电机及其驱动器。

控制流程图如图 10 所示，整体工作流程为：深度相机实时获取甘蔗蔗梢的目标高度数据，随后将蔗梢高度数据传输至 STM32 单片机，STM32 单片机可实时获取切梢器的实际高度，通过对目标高度和实际高度的比较，实时计算高度偏差 e 和偏差变化率 e_c。偏差 e 的计算公式为

$$e = h_{target} - h_{current} \tag{3}$$

式中 h_{target}——深度相机测量的蔗梢高度

$h_{current}$——切梢器高度

偏差变化率 e_c 为

$$e_c = \frac{\Delta e}{\Delta t} \tag{4}$$

式中 Δe——当前时刻误差和上一时刻误差的差值

Δt——两次采样/控制更新之间的时间差

在模糊 PID 控制模块中，STM32 单片机对偏差 e 和偏差变化率 e_c 进行模糊化处理，生成模糊语言变量 E 和 E_C。通过模糊规则表进行推理，得出控制参数修正值 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D。随后，STM32 通过去模糊化处理，将模糊推理结果转化为具体的 PID 参数调整值。动态调整后的 PID 参数会直接应用于控制器。更新后的 PID 控制器在 STM32 上运行，生成伺服电机的速度控制信号。

伺服电机根据模糊 PID 控制模块生成的速度控制信号，执行正向或反向调整操作，以逐步接近目标高度位置。在调整过程中，切梢器的实时位置信息通过拉线位移传感器反馈至系统。系统根据反馈信息动态计算偏差并生成新的控制信号，持续调整伺服电机的运行状态，直至切梢器达到目标高度。

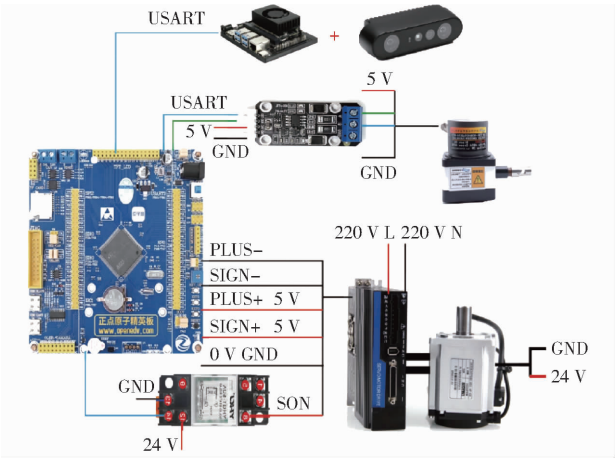

图 9 控制系统总体构成图

Fig. 9 Overall schematic of control system

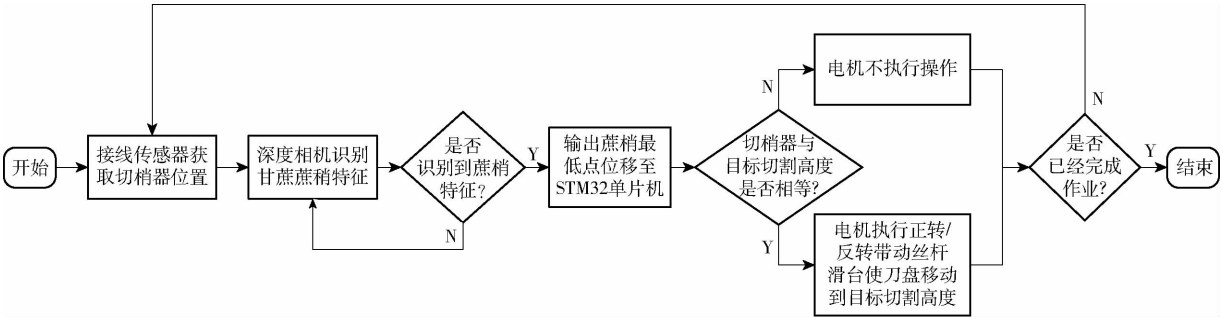

图 10 控制流程图

Fig. 10 Control flowchart

5 试验

5.1 试验方案

试验旨在验证模糊自适应 PID 切梢器智能定位控制系统的性能，建立了模糊自适应 PID 切梢器智能定位控制系统试验平台，如图 11 所示，包括奥比中光 Gemini 2 深度相机、Jetson Orin NX 开发板、STM32F103ZET6 单片机、拉线位移传感器、伺服电机及其驱动器、铝型材、刀盘支撑架和切梢刀盘。其中，深度相机用于实时采集甘蔗蔗梢的三维空间高度数据，Jetson Orin NX 将采集到的数据通过串口传输到 STM32F103ZET6 单片机，通过模糊 PID 算法动态调节伺服电机转速，以实现切梢器高度的精准调整。

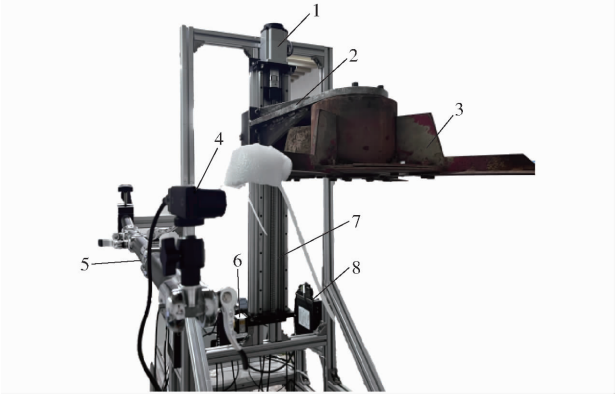

图 11 切梢器智能定位试验平台

Fig. 11 Diagram of intelligent topping mechanism positioning test platform

1. 伺服电机 2. 刀盘支撑架 3. 刀盘 4. 深度相机及云台 5. 相机支撑臂 6. 拉线位移传感器 7. 丝杆滑台 8. 伺服电机驱动器

5.2 PID 对比试验

试验在切梢器智能定位试验平台上进行，位移传感器记录切梢器的实时位置，伺服电机驱动切梢器进行高度调整。试验通过模拟切梢器的实际工作状态，对比模糊 PID 控制和传统 PID 控制的性能。

试验方法包括分别设置传统 PID 控制和模糊 PID 控制两种控制方式，记录切梢器从相同初始位置到相同目标位置的调节过程数据，并以响应时间、

超调量和超调次数作为主要评价指标。

试验结果如图 12 所示，数据通过位移传感器实时采集切梢器的高度变化。结果表明，在响应时间方面，模糊 PID 在 300.82 mm 达到稳态，误差为 0.82 mm，响应时间仅为 1.24 s；相比之下，传统 PID 在 298.91 mm 达到稳态，误差为 −1.09 mm，响应时间为 1.36 s，模糊 PID 响应时间缩短了 0.12 s。在超调高度方面，模糊 PID 的超调高度仅为 4.63 mm，而传统 PID 需要 2 次超调才能达到目标高度，分别出现 12.80 mm 和 −3.56 mm 的超调现象。

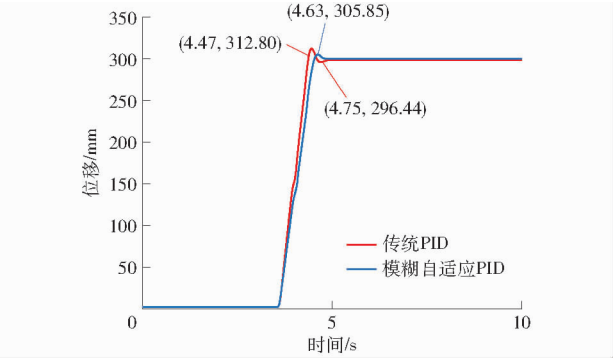

图 12　传统 PID 和模糊 PID 性能曲线

Fig. 12　Performance curves of conventional PID and fuzzy PID

综合分析可见，模糊 PID 控制器在响应速度和稳定性方面表现更优，能够更快、更稳定地接近目标高度，提高了系统的动态适应性和控制性能。

5.3　控制系统响应时间试验

为了验证切梢器智能定位系统的工作可靠性，对控制系统进行了响应时间检测试验，重点评估最大范围高度调节过程中的响应速度、响应时间以及超调现象。

通过位移传感器实时采集切梢器的高度变化，试验结果如图 13 所示，在上升过程中，系统的响应速度为 289.36 mm/s，在 300.84 mm 达到稳态，响应时间为 2.11 s，误差为 0.84 mm。在下降过程中，响应速度为 273.16 mm/s，在 −299.13 mm 达到稳态，响应时间为 2.24 s，误差为 −0.87 mm。

在调节过程中，系统出现了轻微的超调现象。在上升阶段，超调量为 5.72 mm；在下降阶段，超调量为 5.64 mm。综合试验结果可见，该系统在最大高度调节范围内表现出优异的响应性能和稳定性。

5.4　相机高度测量误差定位试验

为验证深度相机在田间的实际定位效果，本文设计了深度相机在距离蔗梢 50、75、100 cm 处的 3 组试验，并进行实际测量。相机识别的高度以相机光心为基点，光心位置为相机的中心线位置，即识别出的蔗梢高度与相机中心线高度相加后得到测量的

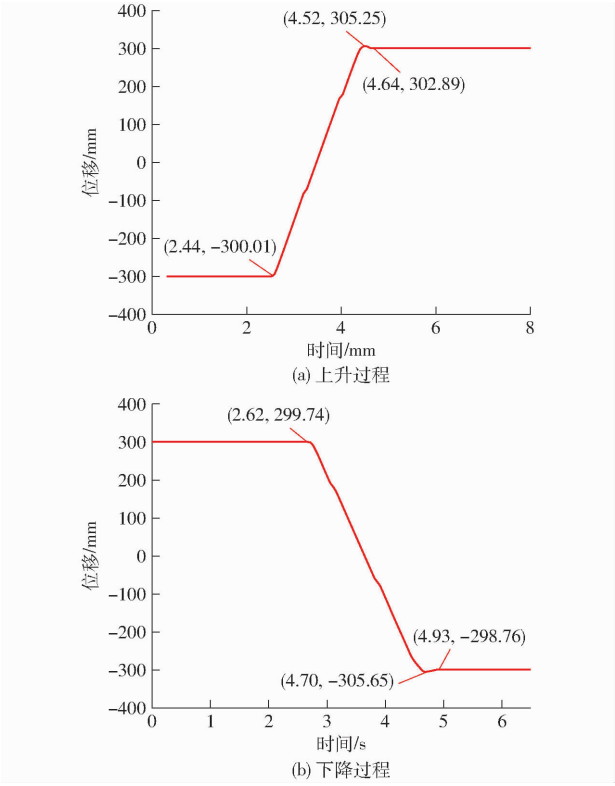

图 13　切梢器最大行程响应曲线

Fig. 13　Maximum stroke response curve of tip cutter

蔗梢高度。试验结果如图 14、15 所示，深度相机在距离蔗梢 50 cm 处的绝对误差为 0 ~ 1 cm，75 cm 处的绝对误差为 1 ~ 3 cm，100 cm 处的绝对误差为 2 ~ 4 cm，平均相对误差分别为 0.189%、0.675% 和 0.949%。随着相机与蔗梢距离的增加，测量误差逐渐增大。造成这种现象的主要原因是 Gemini 2 深度相机采用的双目结构光技术，当距离增加时，单个像素覆盖的物体表面积增大，导致深度分辨率下降，从而放大了测量误差。试验表明，相机在距离蔗梢 100 cm 范围内的平均相对误差满足甘蔗收获机的需求。

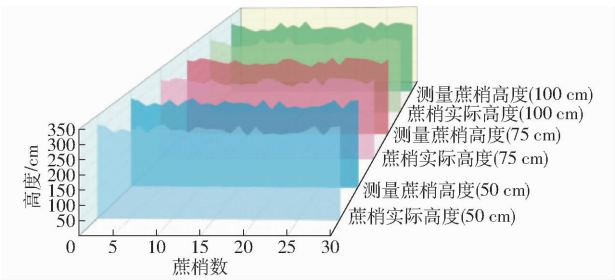

图 14　不同相机与蔗梢距离的测量误差 3D 瀑布图

Fig. 14　Measurement error 3D waterfall chart of distance to cane tip for different camera distances

5.5　动态识别定位试验

动态识别定位试验旨在测试控制系统与识别系统的动态追踪能力。试验过程如图 16 所示，人工手握甘蔗由下至上进行移动识别。同时控制切梢器调

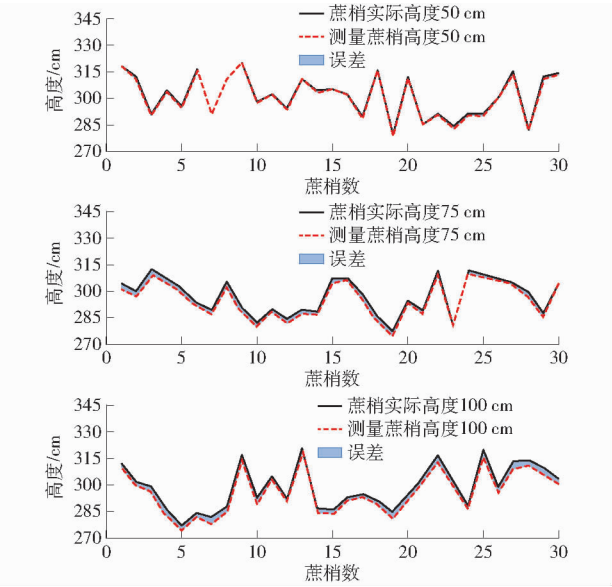

图 15 不同相机与蔗梢距离的测量误差折线图

Fig. 15 Error bar chart for measuring distance to cane tip for different camera distances

整至目标位置。深度相机实时跟踪蔗梢的高度变化并记录识别反应时间,单片机记录拉线传感器切梢器的调节位移。记录深度相机高度,并且使用伸缩尺来测量实际蔗梢高度,深度相机实时跟踪蔗梢的高度变化。该系统的响应时间为从系统检测到甘蔗顶部高度变化(深度相机识别)到切梢器完成调整之间的时间。



图 16 蔗梢高度变化及切梢器响应过程图

Fig. 16 Cane tip height variation and topping mechanism response process diagram

试验结果如图 16、17 及表 3 所示,在蔗梢以不同的速度(140.07 ~ 349.43 mm/s)上下移动条件下,平均响应时间为 0.387 s,平均识别时间为 0.08 s。

6 结论

(1)为解决甘蔗收获机驾驶员仅依赖肉眼和经验判断蔗梢位置,难以实时精准调整切割高度的问题,提出了一种基于模糊自适应 PID 控制和深度相机结合的切梢器智能定位系统。利用深度相机结合 YOLO v8 实例分割模型,系统能够实时检测蔗梢位置,将像素坐标转换为相机坐标,并获取蔗梢高度。试验结果表明,深度相机在距离蔗梢 50、75、100 cm 处的平均相对误差分别为 0.189%、0.675% 和 0.949%,能够满足田间甘蔗机械收获的精度需求,具有较高的精准性。

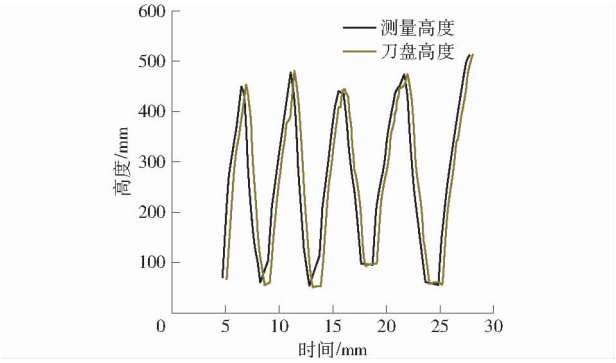

图 17 蔗梢高度变化及切梢器响应折线图

Fig. 17 Line chart of cane tip height variation and topping mechanism response

表 3 不同甘蔗移动速度的系统响应时间

Tab. 3 System response time at different cane moving speeds

序号	甘蔗移动位移/mm	甘蔗移动速度/(mm·s^{-1})	系统响应时间/s
1	386.74	140.07	0.455
2	454.63	158.63	0.342
3	343.32	166.18	0.392
4	417.83	171.38	0.379
5	378.81	210.68	0.376
6	389.83	226.65	0.415
7	423.40	247.02	0.424
8	375.29	349.43	0.310

(2)相比传统 PID 控制器,模糊自适应 PID 控制器在响应速度、超调量及稳态误差方面表现优越。试验数据表明,模糊 PID 控制器将切梢器超调量由传统 PID 的 12.80 mm 减少至 4.63 mm,模糊 PID 响应时间缩短了 0.12 s,为 1.24 s,稳态误差控制在 ±2 mm 以内,具有良好的动态适应性与稳定性。

参 考 文 献

[1] 沈中华, 夏爱强, 董志康, 等. 复杂环境下蔗梢图像分割方法研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(12): 113 - 118.
SHEN Zhonghua, XIA Aiqiang, DONG Zhikang, et al. Research on sugarcane top image segmentation method in complex environments[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(12): 113 - 118. (in Chinese)

[2] 陆盼. 广西甘蔗机械化收获发展现状调查及影响因素研究[D]. 南宁:广西大学, 2023.
LU Pan. Investigation on the development status and influencing factors of mechanized sugarcane harvesting in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2023. (in Chinese)

[3] 刘庆庭,黄瑶,蒋姣丽,等. 甘蔗机械化收获技术与装备研究综述[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 1 - 21.
LIU Qingting, HUANG Yao, JIANG Jiaoli, et al. Review on mechanized sugarcane harvesting technology and equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 1 - 21. (in Chinese)

[4] 李尚平, 卞俊析, 李凯华, 等. 基于改进 YOLO v5s 的复杂环境下蔗梢分叉点识别与定位[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 247 - 258.
LI Shangping, BIAN Junxi, LI Kaihua, et al. Identification and localization of sugarcane top bifurcation points in complex environments based on improved YOLO v5s[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 247 - 258. (in Chinese)

[5] WEN C, HOU B, LI J, et al. Height estimation of sugarcane tip cutting position based on multimodal alignment and depth image fusion[J]. Biosystems Engineering, 2024, 243: 93 - 105.

[6] 麻芳兰, 林亚洲, 董超, 等. 小型甘蔗收获机切梢装置液压系统的设计及试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 55 - 61.
MA Fanglan, LIN Yazhou, DONG Chao, et al. Design and experiment of the hydraulic system for the top-cutting device of a small sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 55 - 61. (in Chinese)

[7] 宫元娟, 金忠博, 白晓平, 等. 甘蔗收获机割台随动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 119 - 128,138.
GONG Yuanjuan, JIN Zhongbo, BAI Xiaoping, et al. Design and experiment of the header-following control system of a sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 119 - 128,138. (in Chinese)

[8] ZHOU B, MA S, LI W, et al. Design and experiment of monitoring system for feed rate on sugarcane chopper harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 228: 109695.

[9] 丁征亮, 马少春, 霍鹏, 等. 甘蔗收获机入土切割控制系统研究[J]. 农业机械学报,2023, 54(增刊 2): 1 - 13.
DING Zhengliang, MA Shaochun, HUO Peng, et al. Research on underground cutting control system of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp. 2): 1 - 13. (in Chinese)

[10] 孙泽宇, 夏长高, 蒋俞, 等. 基于 QBP - PID 的履带式作业机全向调平控制研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 397 - 406.
SUN Zeyu, XIA Changgao, JIANG Yu, et al. Omnidirectional leveling control of a crawler-type operation machine based on QBP - PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 397 - 406. (in Chinese)

[11] HU Q, FAN Z, ZHANG X, et al. Robust localization and tracking control of high-clearance robot system servicing high-throughput wheat phenotyping[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 229: 109793.

[12] JOCHER G, QIU J, CHAURASIA A. Ultralytics YOLO[CP/OL]. [2025 - 01 - 02]. https://github.com/ultralytics/ultralytics.

[13] BOLYA D, ZHOU C, XIAO F, et al. YOLACT: real-time instance segmentation[C]// 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV),2019: 9156 - 9165.

[14] 陈一路, 冯艳妮, 闫智辉, 等. 利用模糊算法实现光学谐振腔锁定优化[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(12): 33 - 38.
CHEN Yilu, FENG Yanni, YAN Zhihui, et al. Optimization of optical resonator locking based on fuzzy algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(12): 33 - 38. (in Chinese)

[15] 孙永佳, 周军, 李学强, 等. 马铃薯联合收获机车身调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 298 - 306.
SUN Yongjia, ZHOU Jun, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of leveling system for potato combine harvester chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 298 - 306. (in Chinese)

[16] 姚颖飞, 陈学庚, 纪超, 等. 基于模糊 PID 控制的玉米精量播种机单体驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 12 - 21.
YAO Yingfei, CHEN Xuegeng, JI Chao, et al. Design and experiment of a monomer driver of a precision maize planter based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 12 - 21. (in Chinese)

[17] 朱德兰, 阮汉铖, 吴普特, 等. 水肥一体机肥液电导率远程模糊 PID 控制策略[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 186 - 191.
ZHU Delan, RUAN Hancheng, WU Pute, et al. Remote fuzzy PID control strategy for nutrient solution conductivity in fertigation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 186 - 191. (in Chinese)

[18] 薛冰, 周利明, 牛康, 等. 基于自适应模糊 PID 的小麦播深控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 93 - 102.
XUE Bing, ZHOU Liming, NIU Kang, et al. Research on wheat sowing depth control system based on adaptive fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 93 - 102. (in Chinese)