

基于机械臂手的甘蔗整秆收获控制仿真分析

支坤芳¹, 郑杜豪¹, 侯明鑫^{1*}, 李星晨¹, 杨桢毅¹, 牛钊君², 孟庆河²

1. 广东海洋大学机械工程学院, 广东 湛江 524088

2. 中国热带农业科学院农业机械研究所, 广东 湛江 524013

DOI: 10.61369/SSSD.2026090024

摘 要 : 针对当前甘蔗整秆收获机械存在伤蔗率高、自动化程度低、夹持稳定性不足等问题, 设计一种适用于田间作业的甘蔗收获机械臂手。采用 SolidWorks 完成三维建模与运动仿真, 建立甘蔗整秆抓取力学模型并进行夹持受力计算, 基于 ROS2 与 MoveIt2 搭建控制仿真平台, 完成轨迹规划与控制器设计。仿真结果表明, 该机械臂手可稳定完成甘蔗抓取、提升、转运等动作, 夹持力匹配甘蔗力学特性, 控制器响应快、定位精度高, 可为甘蔗整秆收获装备智能化提供技术参考。

关 键 词 : 甘蔗整秆收获; 机械臂手; SolidWorks 仿真; 受力分析; MoveIt2

Simulation Analysis of Sugarcane Whole-Stem Harvesting Control Based on Robotic Arm

Zhi Kunfang¹, Zheng Duhao¹, Hou Mingxin^{1*}, Li Xingchen¹, Yang Zhenyi¹, Niu Zhaojun², Meng Qinghe²

1 School of Mechanical Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088

2. Institute of agricultural machinery research, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524088

Abstract : Addressing the current issues of high sugarcane damage rates, low automation, and insufficient clamping stability in sugarcane whole-stem harvesting machinery, a sugarcane harvesting robotic arm suitable for field operations is designed. SolidWorks is used to complete 3D modeling and motion simulation, establish a mechanical model for grasping the whole sugarcane stem, and perform clamping force calculations. A control simulation platform is built based on ROS2 and MoveIt2 to complete trajectory planning and controller design. The simulation results show that the robotic arm can stably complete actions such as grasping, lifting, and transporting sugarcane. The clamping force matches the mechanical characteristics of sugarcane, and the controller has fast response and high positioning accuracy, providing a technical reference for the intelligentization of sugarcane whole-stem harvesting equipment.

Keywords : harvesting of whole sugarcane stalks; robotic arm; SolidWorks simulation; force analysis; MoveIt2

引言

我国甘蔗主产区机械化收获仍以切段式为主, 整秆收获具有蔗汁损失少、商品化率高、后续加工效益好等优势, 是高端甘蔗收获技术发展方向^[1-3]。现有整秆收获设备多采用刚性夹持结构, 对甘蔗外形适应性差, 易出现压裂、打滑、倒伏等问题^[4-6]。机械臂手具备柔性调节、精准控制、自主作业能力, 可显著提升收获质量^[7-9]。目前, 农业机械臂多集中于移栽、采摘等场景, 针对甘蔗整秆收获的专用机械臂手研究较少, 且缺乏完整的建模—受力—控制—仿真体系。本文以甘蔗整秆收获为目标, 设计多关节机械臂手, 通过 SolidWorks 建模验证结构合理性, 开展抓取静力学计算, 基于 ROS2 (Robot Operating System 2) 与 MoveIt2 实现运动规划与闭环控制, 通过联合仿真验证方案可行性, 为实机开发提供理论依据。

项目信息:

广西重点研发计划项目 (桂科 AB23026069;

桂农科 AB241484034);

广东省自然科学基金 (2025A1515012901);

广东海洋大学创新训练项目 (202410566012)。

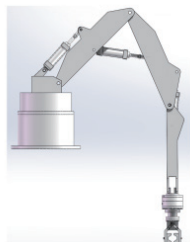
通讯作者: 侯明鑫, 教授 / 博士, houmx@gdou.edu.cn

一、机械臂建模与甘蔗抓取受力分析

(一) 作业背景



(a) 甘蔗整杆收获机械臂



(b) 甘蔗作业机械臂设计图

图1 甘蔗整杆收获机械臂手装备

我国甘蔗种植与收获作业多集中于南方丘陵及缓坡地块，传统人工收获效率低、劳动强度大，现有切段式收获机虽普及率较高，但存在蔗茎破损严重、蔗汁流失、原料品质下降等问题。整杆式收获能够最大程度保留甘蔗完整性，提升储运与加工效益，是甘蔗机械化收获的重要发展方向。图1(a)为田间实际作业场景下的甘蔗整杆收获机械臂，图1(b)为甘蔗作业机械臂设计结构，该装备以多自由度机械臂手为核心执行部件，可适应田间不规则蔗株分布与复杂地形扰动，完成精准定位、柔性夹持、稳定提升等连续动作。与传统刚性夹持机构相比，本机械臂手采用关节式串联结构，配合自适应夹持末端，可根据甘蔗茎秆直径与姿态实时调整夹持姿态与力度，有效降低压裂、打滑、倒伏等损伤风险，满足田间高效、低损、自动化整杆收获需求，为甘蔗收获装备智能化升级提供可行技术路径。

(二) 甘蔗整杆抓取受力计算

在针对最大抓取质量为250kg甘蔗的整杆抓取过程中，机械臂手需精确计算并施加合适的夹持力。设甘蔗最大质量 m_{max} 为250kg，重力加速度 g 取 $9.8m/s^2$ ，则甘蔗所受最大重力 F_{gmax} 为： $F_{gmax}=m_{max}\cdot g=250\times 9.8=2450N$ 。为确保甘蔗在抓取过程中不滑落，机械臂手需提供的最小夹持力 F_{cmin} 应满足静摩擦条件，即 $F_{cmin}\geq \frac{F_{gmax}}{\mu}$ ，其中 μ 为机械臂手与甘蔗接触面间的静摩擦系数，其值取决于材料表面特性，一般可通过实验测定。同时，为防止甘蔗因夹持力过大而受损，需根据甘蔗的抗压强度 σ_{max} 和接触面积 A 来确定夹持力的上限，即 $F_{cmin}\leq \sigma_{max}\cdot A$ 。通过综合考量这些因素，可设计出既稳定又安全的机械臂手夹持策略。

二、基于 MoveIt2 的机械臂控制仿真

在完成机械臂手的结构设计与甘蔗抓取静力学验证后，为进一步验证其在复杂田间环境下的运动控制性能与轨迹规划能力，本研究构建了基于 ROS2 的高保真仿真平台。该平台利用 MoveIt2 运动规划框架，旨在实现从几何模型到动力学仿真的映射，以及闭环控制策略的验证。

1. 仿真环境构建与模型集成

首先，将 SolidWorks 中完成的机械臂手三维模型通过 sw_urdf_exporter 插件导出为 URDF (Unified Robot Description

Format) 格式。为确保仿真精度，需在 URDF 文件中精确配置各连杆 (Link) 的质量、质心坐标及惯性张量，并定义关节 (Joint) 的运动学参数 (DH 参数)。随后，将配置好的模型导入 Gazebo 物理仿真环境。为实现 ROS2 与 Gazebo 的通信，本研究配置了 gazebo_ros_control 插件，加载 JointStateController 以实时发布关节状态，并针对各驱动关节加载 JointTrajectoryController 以接收外部轨迹指令。在此过程中，特别针对甘蔗茎秆的物理属性进行了建模，将其定义为具有特定摩擦系数和碰撞属性的柔性体，以模拟真实的抓取环境。

2. 运动规划场景配置

基于 MoveIt2 的 Setup Assistant，对机械臂手进行配置生成。通过配置运动学求解器 (Kinematics Solver)，本研究选用了 KDL (Kinematics and Dynamics Library) 算法以解决逆运动学问题。在 Planning Scene 模块中，构建了包含整杆甘蔗目标物体的虚拟作业场景 (如图2所示)。通过 RViz2 可视化界面，实现了机械臂手与甘蔗模型的同步显示，为后续的轨迹规划提供了可视化的交互环境。

3. 控制器设计与轨迹规划

针对甘蔗整杆收获的特定工况，本研究设计了基于位置控制的闭环控制策略。利用 MoveIt2 内置的 OMPL (Open Motion Planning Library) 算法库，采用 RRTConnect (快速探索随机树连接) 算法进行运动学求解。在规划过程中，设定了关节位置、速度及加速度的约束条件，以确保生成的轨迹符合机械臂的动力学特性，避免过大的冲击力对甘蔗造成损伤。针对甘蔗抓取任务，规划了从初始位姿到抓取位姿的无碰撞平滑轨迹。控制器通过订阅 /joint_trajectory 话题接收目标轨迹点，并通过 PID 控制算法驱动 Gazebo 中的虚拟关节运动。



图2 MoveIt2 中的机械臂手建模与整杆甘蔗抓取仿真

4. 仿真结果与分析

仿真结果表明，该控制架构具有良好的实时性与鲁棒性。在模拟的甘蔗抓取任务中，机械臂手能够根据视觉反馈 (模拟) 实时调整末端执行器位姿，精确驱动各关节协同运动。在接近、姿态调整及夹持提升过程中，控制器响应迅速，轨迹跟踪误差控制在允许范围内，未出现奇异点或剧烈抖动现象。特别是在夹持力闭环控制仿真中，系统能根据反馈力矩动态调整关节输出，验证了所设计控制策略在田间复杂作业环境下的可行性，为后续实物样机的控制系统开发奠定了坚实的理论基础。

三、结束语

本文针对甘蔗整秆收获过程中存在的伤蔗率高、自动化程度低等问题，设计了一种基于机械臂手的甘蔗收获控制系统。通过 SolidWorks 完成了机械臂手的三维建模与初步仿真验证，并对甘蔗整秆抓取过程进行了详细的受力分析。进一步，依托 ROS2 与

MoveIt2 搭建了高保真仿真平台，实现了机械臂手的运动规划与闭环控制。仿真结果表明，所设计的机械臂手能够稳定、高效地完成甘蔗的抓取、提升与转运任务，且控制器响应迅速、定位精度高。本研究为甘蔗整秆收获装备的智能化提供了可行的技术路径与理论依据。

参考文献

[1] 凌莉. 甘蔗全程机械化收割过程中的损失控制技术 [J]. 河北农机, 2025(14): 30–32.
[2] 汪鸿宇. 丘陵山地甘蔗割堆机输送及集堆装置的设计与仿真分析 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2025.
[3] 李明春; 张顺生; 李啸宇等. 中国甘蔗收割机的发展现状与展望 [J]. 热带农业科学, 2025, 45(01): 126–132.
[4] 韦雨彤. 丘陵地区履带式甘蔗收获机调平控制系统设计与试验研究 [D]. 南宁: 广西民族大学, 2025.
[5] 韦志高. 甘蔗收获机械化的影响因素及应对策略 [J]. 农村科学实验, 2026(04): 91–93.
[6] 李朝博. 丘陵山地甘蔗割堆机整机设计与研究 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2025.
[7] 李隆钦. 基于双目 DSO 算法的蔗根定位与抓取研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2024.
[8] 梅松, 夏先飞, 何静等. 果园高效机械化生产装备现状与发展重点 [J]. 中国农学通报, 2025, 41(26): 117–129.
[9] 刘建林. 面向精密装配任务的机械臂多目标轨迹规划研究 [D]. 贵州: 贵州大学, 2025.