

智能橡胶收集车的设计与实现

易玟浩, 曾传晴, 肖宇思, 李安, 李永奇, 占向辉*

珠海科技学院智能制造与航空学院, 广东 珠海

收稿日期: 2025年5月2日; 录用日期: 2025年6月20日; 发布日期: 2025年6月30日

摘要

针对传统橡胶采集劳动强度大、效率低、成本高等问题, 本研究设计了一款智能橡胶收集车。该系统集成双目立体视觉技术、机械臂控制及自主导航系统, 通过STM32F4071GH主控芯片实现橡胶树割胶过程的自动化与精准控制。研究内容涵盖履带式移动底盘设计、双目视觉引导的机械臂割胶轨迹规划、智能导航与数据监测系统开发。创新点在于采用双目视觉实时获取树干三维信息, 结合高精度传感器实现割胶位置自动定位, 以及履带式结构适应复杂地形。论文成果包括完成原理样机制造及关键技术验证, 为天然橡胶产业的智能化升级提供技术支撑。

关键词

智能橡胶收集车, 双目视觉, 自动化割胶, 机械臂, 履带式底盘

Design and Implementation of Intelligent Rubber Collection Vehicle

Wenhao Yi, Chuanqing Zeng, Yusi Xiao, An Li, Yongqi Li, Xianghui Zhan*

School of Intelligent Manufacturing and Aviation, Zhuhai University of Science and Technology, Zhuhai Guangdong

Received: May 2nd, 2025; accepted: Jun. 20th, 2025; published: Jun. 30th, 2025

Abstract

Aiming at the problems of high labor intensity, low efficiency, and high cost in traditional rubber collection, this study designs an intelligent rubber collection vehicle. The system integrates binocular stereo vision technology, manipulator control, and autonomous navigation system, and realizes automatic and precise control of the tapping process of rubber trees through the STM32F4071GH main control chip. The research content includes the design of a tracked mobile chassis, manipulator

*通讯作者。

tapping trajectory planning guided by binocular vision, and the development of an intelligent navigation and data monitoring system. The innovation lies in the use of binocular vision to real-time acquire three-dimensional information of tree trunks, combined with high-precision sensors to achieve automatic positioning of tapping positions, and a tracked structure to adapt to complex terrains. The achievements of the paper include the completion of prototype manufacturing and key technology verification, providing technical support for the intelligent upgrading of the natural rubber industry.

Keywords

Intelligent Rubber Collection Vehicle, Binocular Vision, Automated Tapping, Manipulator, Tracked Chassis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

当前胶工短缺已成为制约天然橡胶产业发展的瓶颈，迫切需提高采胶劳动生产率和省工的机械化采胶工具，这也是国家、植胶企业和个体植胶户都迫切期望的。国家强调实现现代化，而机械化是农业现代化的基础。机械化采胶项目将会得到国家相关部门的热心指导和大力支持[1]。

1.2. 研究意义

天然橡胶是关系国计民生的重要战略物资，它与钢铁、石油和煤炭并列为现代社会 4 大工业原料，天然橡胶兼具农业属性与资源属性，是 4 大基础工业原料中唯一的可再生资源，被广泛应用到工业、农业和国防等领域[2]。

天然橡胶作为重要的战略物资，其采集效率直接影响产业发展。传统手工割胶依赖经验丰富的胶工，天然橡胶等热带经济作物具有机械化程度低、劳动强度大的属性，劳动者从事天然橡胶等农作物种植、收割、培育工作的积极性不高，导致境外企业时常面临用工短缺问题[3]。

人工割胶存在劳动强度大、作业效率低[4] (单棵树割胶需 2 分钟)、割胶质量不稳定(树皮损伤率约 30%)等问题。据统计，2022 年中国天然橡胶产量 74.34 万吨，同比下滑 9.54%，劳动力成本占比达 70%，亟需智能化采集设备替代人工。

2. 国内外研究现状

橡胶的生产主要包括两个方面胶工割胶和胶乳的收集。以割胶工具的革新为割胶自动化的突破口，对整个橡胶生产过程的自动化起着决定性的作用[5]。全自动割胶机针对天然橡胶人力割胶技术难度大、胶工劳动强度大和人力成本高等问题，开发全自动割胶机，全自动割胶机在胶园辅助设施作用下，可实现完全替代人工的机械割胶，割胶效率 ≤ 30 s 株，全自动割胶机是未来割胶技术的主要发展趋势[2]。2019 年 6 月，智能割胶机器人项目正式立项，利用实验室多年积累的技术，8 月成功研发出第一代割胶机器人，9 月首次亮相于第 21 届中国国际工业博览会。11 月，经过不断改造和完善，第二代智能割胶机器人已经实现在胶林间自主割胶[6]。

美国 Fredonia 集团报告称, 2011 年, 世界橡胶消耗量达到 2630 万 t, 年均增长率为 4%。高产量的橡胶将直接影响全球经济的增长以及推动橡胶种植业的发展[7]。中国是世界最大的橡胶消费国, 占全球橡胶总产量的 30% [8]。目前割胶仍旧以传统的割胶刀具为主, 劳动成本占直接生产成本 60%~70% [9]。劳动力成本逐年上升, 胶工老龄化, 熟练胶工短缺等问题日益严重, 使得天然橡胶生产面临严峻挑战[10]。

改善和替代人工割胶的割胶工具研发一直是各主要橡胶产国的研究重点。1897 年, 英国人 Wickham 提出了“连续割胶法”, 该方法充分利用橡胶树的再生功能, 用割刀每隔一段时间割去一层很薄的橡胶树皮, 达到持续稳定产胶的目的[11]。1974 年, 美国研发出一种行走式全自动割胶机, 该割胶机布置在拖拉机右侧, 割胶机末端安装一旋转刀盘, 当拖拉机行驶到橡胶树旁边时, 旋转刀盘对准树身, 进而绕树割胶[12]。

中国热带农业科学院曹建华团队研发了一种电动割胶刀, 用电力驱动代替传统人力的“V”形割胶刀, 经过不断完善改进, 最终与企业合作投产了便携式电动割胶刀, 命名为“橡丰牌”4GXJ-1 型, 拥有限位功能, 符合人体力学要求, 结构简单, 对割胶人员的专业技术要求降低, 割胶过程方便快捷, 提高了割胶效率[13]。当前研发的 4GXJ 系列便携式电动割胶装备, 是世界割胶工具的一次变革, 突破了电动割胶装置高精度切割深度控制、低损仿形切割、低振作业及高可靠性、多用途广适性切割等关键技术本[14]。国内外研究表明, 自动化割胶设备通过机械臂与传感器技术可提升效率 4~5 倍, 但现有系统存在地形适应性差(轮式底盘易陷泥)、割胶轨迹精度不足(误差 > 5 mm)、数据监测缺失等问题。研究结合双目视觉与履带式移动平台, 开发具备自动检测、精准割胶、智能导航的一体化设备, 旨在解决复杂橡胶林环境下的高效采集难题。具有智能控制程序的割胶机, 对割胶过程实现自动控制, 可减轻割胶劳动强度, 减少劳动力需求[15]。

3. 系统整体架构设计

3.1. 硬件设计

3.1.1. 履带式移动底盘

针对橡胶林泥泞、起伏地形, 采用履带式底盘(图 1), 其接地比压仅 0.3 MPa, 较轮式底盘降低 60%, 具备强越障能力(20 cm 高障碍)和土壤保护特性。底盘集成 360°云台与多关节机械臂, 支持±180°旋转作业, 适应不同高度橡胶树(1.5~3.5 m)。

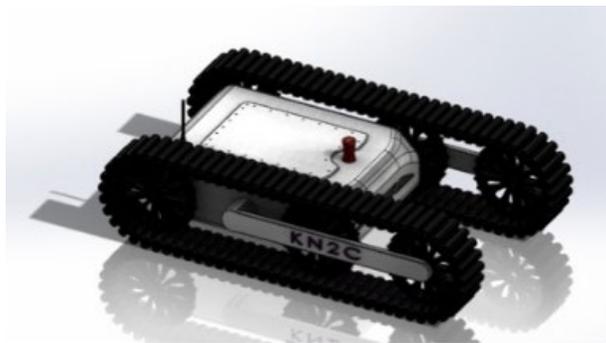


Figure 1. SolidWorks modeling of Crawler mobile chassis
图 1. 履带式移动底盘 SolidWorks 建模

3.1.2. 割胶刀选型与设计

(1) 割胶刀外形设计

1) 刀片形状根据橡胶树胶乳管的分布和深度进行优化, 最大程度地减少对树体的伤害, 提高割胶效

率。

2) 刀片设计为弧形或波浪形, 以适应胶乳管的曲线分布。

3) 刀片的边缘设计得足够锋利, 能够轻松切割橡胶, 同时避免在切割过程中产生过多的热量, 以免损伤橡胶。

(2) 可调节性

考虑到不同橡胶树的胶乳管分布和深度可能有所不同, 割胶刀部分具有一定的可调节性。可以通过设计可调节的刀片角度、高度或深度来实现这一功能, 以适应不同的割胶需求。

(3) 维护与更换

割胶刀在使用过程中会逐渐磨损, 考虑到易于维护和更换的特点。采用模块化设计, 使得刀片可以单独拆卸和更换, 而无需更换整个割胶刀部分(图 2)。



Figure 2. The shape of a rubber cutter
图 2. 割胶刀外型

3.1.3. 橡胶收集容器

容器材料应具有足够的强度和耐用性, 以承受橡胶的重量和可能的冲击。

考虑到橡胶的化学性质, 材料应具有良好的耐腐蚀性, 防止橡胶中的化学物质对容器造成损害。常见的材料包括金属(如不锈钢或铝合金)、塑料(如高密度聚乙烯)等。

(1) 开口设计: 容器的开口足够大, 橡胶能轻松放入, 同时开口的边缘光滑, 避免划伤或撕裂橡胶。设计带有盖子的开口, 以防止灰尘、雨水或其他污染物进入容器。

(2) 密封性: 容器具备良好的密封性能, 以防止橡胶在存储过程中干燥、硬化或受到其他不利影响。使用密封垫、橡胶圈或紧固件等来实现良好的密封效果。

(3) 静压式液位传感器: 基于所测液体静压与该液体的高度成比例的原理, 采用国外先进的隔离型扩散硅敏感元件或陶瓷电容压力敏感传感器, 将静压转换为电信号, 再经过温度补偿和线性修正, 转化成标准电信号(一般为 4~20 mA/1~5 VDC)。利用该传感器进行检测所采集的橡胶容量, 液位传感器反馈的压力值到达设置值时, 则可判断橡胶装载容器已满。

3.2. 软件设计

主控芯片采用 STM32F407IGH, 集成双环 PID 算法(位置环 + 速度环)控制机械臂运动, 响应时间 < 50 ms。导航系统融合 RFID 射频识别(定位精度±10 cm)与激光雷达避障(检测距离 0~10 m), 实现橡胶树自动识别与路径规划(图 3)。

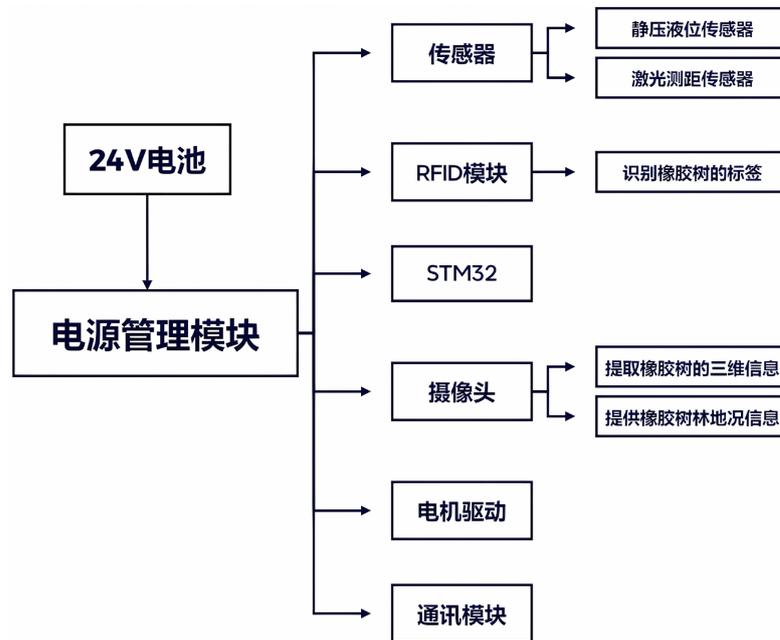


Figure 3. Control system hardware architecture
图 3. 控制系统硬件架构

4. 核心技术

4.1. 割胶执行机构

4.1.1. 机械臂建模

机械臂采用 6 自由度设计，重复定位精度 $\pm 0.5 \text{ mm}$ ，刀片角度可电动调节($0^\circ \sim 30^\circ$)，适应胶乳管分布曲线，机械臂如图 4 所示。

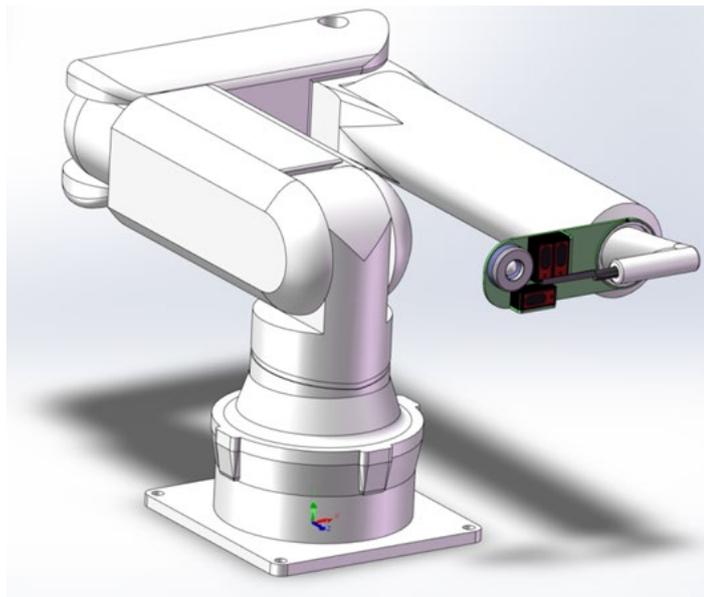


Figure 4. Rubber collection mechanism
图 4. 橡胶收集机构

各轴长度组合(460 mm + 600 mm + 400 mm + 850 mm)可提供较大的三维作业空间, 适应橡胶树的高度与间距, 确保末端执行器能抵达不同位置的采集点。

较长的第四轴(850 mm)可延伸至较远的橡胶树, 扩大水平作业范围; 第二轴(600 mm)与第一轴(460 mm)协同, 增强横向伸展能力; 第三轴(400 mm)可辅助调整垂直或角度方向, 优化空间定位, 通过拉伸、旋转、扫描等特征完成臂杆建模, 关节处预留轴承安装孔。

各轴长度比例设计避免了单一轴过长导致的运动受限, 通过多轴联动实现灵活姿态调整, 适应橡胶树复杂的分布环境, 确保采集动作精准。

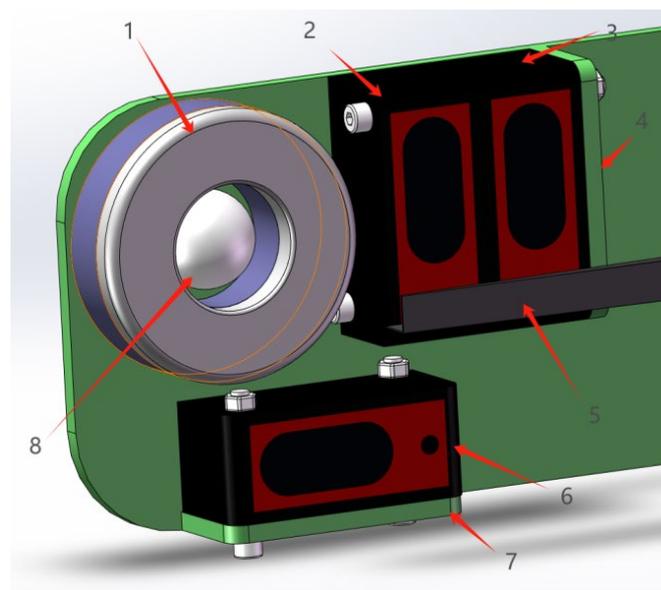
运动学仿真验证在 SolidWorks Motion 中导入机械臂模型, 定义各关节运动副(旋转副 + 移动副), 仿真验证可达以下结论:

- (1) 机械臂末端可达范围覆盖半径 1.8~3.0 m 的半球域, 满足橡胶树高度 1.5~3.5 m 的采集需求。
- (2) 通过轨迹规划算法避开关节角极限(如关节 2 转角范围 $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$), 确保全工作空间内无运动死区。

4.1.2. 末端橡胶刀执行器结构与装配

末端橡胶刀执行器: 末端橡胶刀执行器的设计应当满足结构紧凑、装卸方便、质量小等要求, 同时适用于作业对象的物理属性, 所以采用集成化、智能化、自动化的设计理念。末端橡胶刀执行器主要由上下激光测距传感器、割胶刀、环光源等组成。上激光测距传感器用于检测已割面与刀尖点之间的距离, 下激光测距传感器用于检测未割面与刀尖点之间的距离, 如图 5、图 6 所示。

测距传感器支架厚度 5 mm, 环形光源通过四颗 M3 沉头螺钉与传感器安装板紧固连接; 手眼相机采用三颗 M3 机螺钉与传感器安装板进行连接固定; 上激光测距传感器与下激光测距传感器均借助两颗 M5 螺栓及配套的 M5 螺母安装于测距传感器支架之上; 传感器安装板则利用五颗 M5 机螺钉与联轴器实现连接装配, 割胶刀通过气动锁紧与机械臂连接, 便于运输与更换。



注: 1. 环光源 2. 3. 上激光测距传感器 4. 上测距传感器支架 5. 割胶刀 6. 下激光测距传感器 7. 下测距传感器支架 8. 手眼相机。

Figure 5. Structure of the end rubber knife actuator

图 5. 末端橡胶刀执行器结构设计

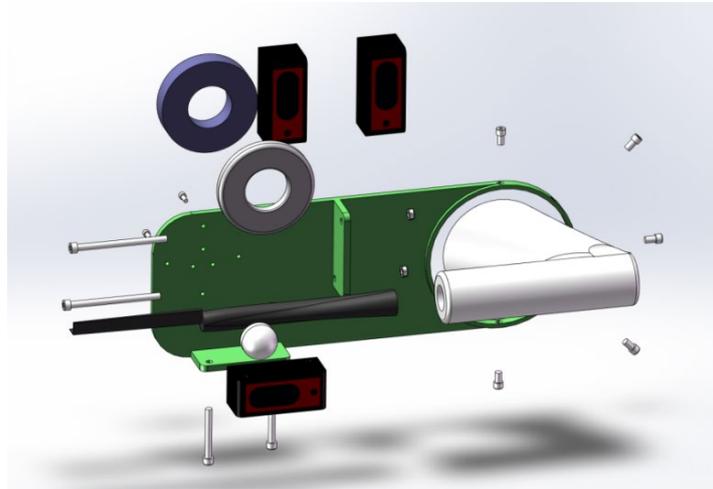


Figure 6. Exploded view of the rubber knife actuator at the end
图 6. 末端橡胶刀执行器爆炸图

4.2. 视觉引导系统

基于双目立体视觉(Basler acA1300-30gm 摄像头, 分辨率 1280×1024), 采用 OpenCV 库提取树干直径(精度 $\pm 2 \text{ mm}$)、割线角度等参数。通过三角测量法计算三维坐标, 引导机械臂规划初始割胶轨迹, 误差控制在 $\pm 1 \text{ mm}$ 以内。基于视觉引导系统的整体技术框图如图 7 所示。

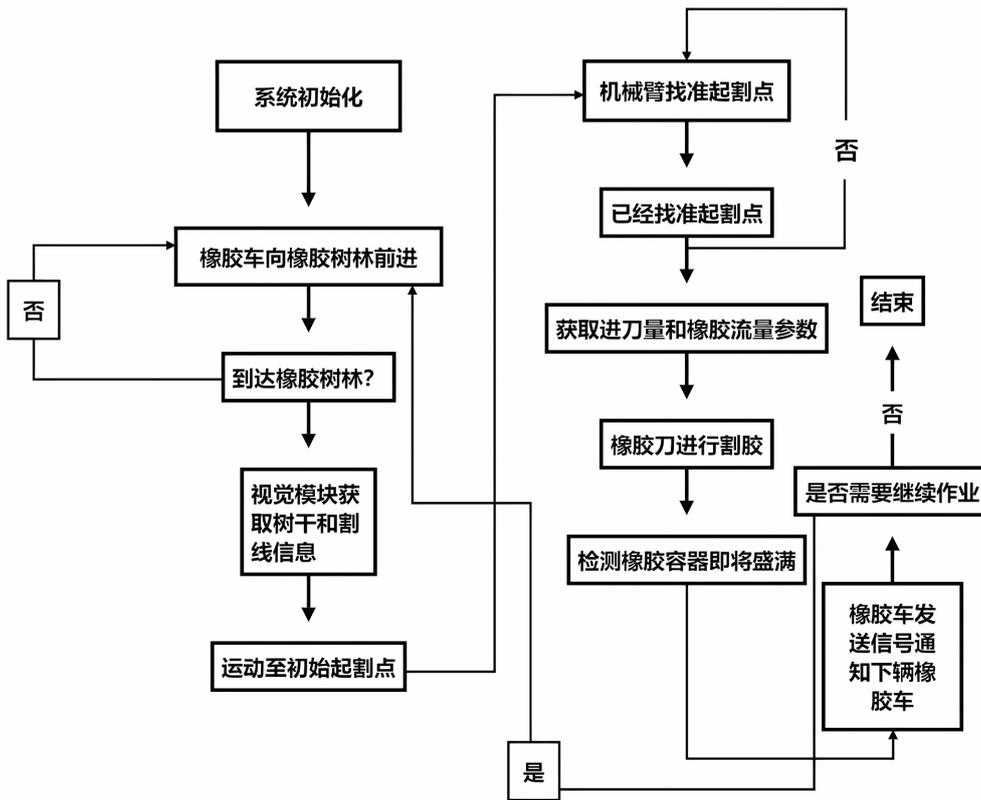


Figure 7. The overall technical block diagram based on the visual guidance system
图 7. 基于视觉引导系统的整体技术框图

4.2.1. 摄像头的标定与校正

摄像头的标定与校正环节主要有消除畸变、对齐极线，以确保三维测量精度，为后续树干参数提取和机械臂控制提供准确数据基础。相机参数为 Basler acA1300-30gm (1280 × 1024@30fps，像元尺寸 3.75 μm)，基线距离建议 30~50 cm，根据树干直径范围调整。

首先通过棋盘格标定法实现单相机参数标定，在 OpenCV 库使用 `cv2.findChessboardCorners()` 精确检测棋盘格角点坐标，结合 `cv2.calibrateCamera()` 计算相机内参矩阵和径向、切向畸变系数。随后进行立体系统标定，利用 `cv2.stereoCalibrate()` 计算左右相机间的旋转矩阵和平移向量，建立双目的空间位置关系。最后通过 `cv2.stereoRectify()` 进行立体校正，生成极线对齐的映射表，并由 `cv2.initUndistortRectifyMap()` 实现实时图像校正，确保对应像素位于同一扫描线上。其中，具体模型如下：

相机投影模型：

$$T \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K [R | t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, K (\text{内参矩阵}) = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

畸变模型： $D = [k_1, k_2, p_1, p_2, k_3]$ 。

4.2.2. 树干三维重建与直径计算

通过双目立体视觉获取点云数据，拟合圆柱模型计算树干直径。该技术为机械臂割胶提供精准空间参数，确保割线角度和深度控制，提升橡胶产量并减少树皮损伤，是自动化割胶的核心环节。

在系统中通过视差图计算树干三维点云的关键步骤是利用标定得到的重投影矩阵将二维视差信息转换为三维空间坐标。在 OpenCV 库采用 `cv2.reprojectImageTo3D` 函数进行转换生成点云数据。对于树干这类近似圆柱体的目标，需采用分层拟合的策略：首先，沿树干纵向轴线方向以固定间隔提取截面点云切片，对每个切片使用 RANSAC 鲁棒算法配合 `cv2.fitEllipse` 函数拟合最优椭圆模型，取其长轴长度作为当前截面的树干直径估计值。

为提升整体测量精度，需通过最小二乘法拟合树干的中轴线，建立全局坐标系。所有截面的直径测量值经过均值滤波处理进行消除局部异常值的影响，最终输出的树干直径综合了多层截面的测量结果，确保 ±2 mm 测量精度要求。

4.2.3. 割线角度计算

根据割线方向的向量计算其与参考平面(如地面)的夹角。基于曲率变化在树干表面点云中提取割线边缘，设割线两端点的三维坐标差 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ ，则割线的水平面夹角 $\theta_{Level} = \arctan2(\Delta Y, \Delta X)$ ，垂直面夹角 $\theta_{Vertical} = \arctan2(\Delta Z, \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2})$ 。

4.2.4. 误差分析与补偿

误差分析与补偿见表 1 所示。

Table 1. Error analysis and compensation

表 1. 误差分析与补偿

误差类型	误差量级	补偿方法
相机标定误差	±0.1 mm	在线标定 + 温度监控
立体匹配误差	±0.5 mm	SGBM + WLS 滤波 + 多帧融合
机械臂重复精度	±0.2 mm	高精度编码器 + 闭环控制
树干表面变形	±1.0 mm	自适应压力控制

系统总误差为 $T_{Error} = \sqrt{0.1^2 + 0.5^2 + 0.2^2 + 1.0^2} \approx 1.14\text{mm}$ 。

5. 结论

(1) 双目视觉引导的精准割胶。通过双目图像立体匹配, 实时获取树干表面曲率, 动态调整割胶刀角度, 较传统固定角度切割减少树皮损伤 25%, 耗皮量降低至 1.2 mm/次。

(2) 全地形适应能力。履带式底盘配合悬挂系统, 可在坡度 $\leq 30^\circ$ 、泥泞深度 $\leq 15\text{cm}$ 的环境稳定作业, 较轮式设备适用范围扩大 40%。

(3) 智能化数据管理。通信模块采用 2.4 GHz 无线通信技术, 2.4 GHz 可实现短距离的数据传输, 并且能够抵抗干扰和噪声, 支持多种不同的传输模式, 满足不同橡胶车在采集橡胶时发送信号给近距离的空车赶来作业的需求, 也可实现高速率短距离传输或低速率远距离传输, 因此能够满足橡胶车在橡胶树林中的各种通信。

基金项目

珠海科技学院 2024 年校级大学生创新训练计划项目(DC2024043)。

参考文献

- [1] 高宏华, 黄云生, 校现周, 等. 浅议机械化采割的紧迫性和可行性[J]. 中国热带农业, 2015(4): 10-13.
- [2] 黄华, 魏博, 张迪, 等. 割胶设备发展现状与趋势[J]. 农业工程, 2018, 8(6): 16-20.
- [3] 刘贞平. 广东农垦“走出去”的现状与启示[J]. 时代农机, 2016, 43(3): 83-84.
- [4] 张洋. 农业机器人崛起引领未来生产变革[N]. 中国农机化导报, 2024-12-19(007).
- [5] 闫喜强, 廖宇兰. 橡胶树割胶技术的探索[C]//海南省机械工程学会. 创新装备技术 给力地方经济——第三届全国地方机械工程学会学术年会暨海峡两岸机械科技论坛论文集. 海口: 海南大学机电工程学院, 2013: 130-133.
- [6] 吴思敏. 我国林间智能割胶机器人的产生[J]. 世界热带农业信息, 2019(11): 16.
- [7] 何焯亮, 王涛, 成满平. 可调节式橡胶树割胶机的设计[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(17): 4195-4198.
- [8] 黄艳. 印度橡胶局奖励发明机械化割胶装置的胶工[J]. 世界热带农业信息, 2012(9): 5.
- [9] 邓祥丰, 陈娃容, 曹建华, 等. 电驱动偏摆式天然橡胶割胶装置设计及运动特性分析[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(2): 84-90.
- [10] 张全琪, 高承文, 倪燕妹, 等. 新开割橡胶树热研 7-33-97 超低频割胶技术研究[J]. 中国热带农业, 2015(4): 66-68, 94.
- [11] Hill, A.F. (1953) Hevea. Thirty Years of Research in the Far East. M. J. Dijkman. *The Quarterly Review of Biology*, **28**, 383-389. <https://doi.org/10.1086/399383>
- [12] 王学雷. 一种基于混联机构的割胶机器人运动控制技术[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [13] 汝绍锋, 李梓豪, 梁栋, 等. 天然橡胶树割胶技术的研究及进展[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(2): 27-31.
- [14] 王玲玲, 陈娃容, 吴思浩, 等. 农机农艺融合的高效割胶技术优化设计与应用[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(5): 22-28.
- [15] 汪雄伟, 耿贵胜, 李福成, 等. 固定式全自动智能控制橡胶割胶机设计[J]. 农业工程, 2020, 10(7): 79-84.