

DOI: 10.3901/JME.2022.19.012

名优茶采摘机器人的系统设计与试验^{*}

周宇杰¹ 吴强¹ 贺磊盈^{1,2} 赵润茂^{1,2} 贾江鸣^{1,2}
陈建能^{1,2} 武传宇^{1,2}

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院 杭州 310018;
2. 浙江省种植装备技术重点实验室 杭州 310018)

摘要: 针对名优茶采摘劳动力短缺的现状,设计了一种适用于自然环境下作业的名优茶采摘机器人。系统由采摘机械手、3P-Delta机械臂、视觉系统和主控系统构成。机器人通过深度相机获取茶蓬图像,利用深度学习和骨架法计算采摘点。从名优茶的生长特征出发,建立了机械臂采摘轨迹模型,采用Bézier曲线对茶叶采摘路径进行优化,降低了机械臂在快速运动过程中的加速度突变,提高了采摘运动的平滑性。利用虚功原理建立机械臂动力学模型,基于滑模控制设计了机械臂采摘控制策略,优化了控制算法中的指数趋近律,有效地抑制了滑模面在快速趋近时的抖振现象。实地测试结果表明,采摘机器人能够实现名优茶的采摘,采摘率和完整率分别为75.53%和54.68%,平均采摘速度为0.451颗/s。

关键词: 采摘机器人; 名优茶; 3P-Delta机械臂; Bézier曲线; 滑模控制; 系统集成

中图分类号: TP3

Design and Experiment of Intelligent Picking Robot for Famous Tea

ZHOU Yujie¹ WU Qiang¹ HE Leiying^{1,2} ZHAO Runmao^{1,2}
JIA Jiangming^{1,2} CHEN Jianneng^{1,2} WU Chuanyu^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018;
2. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018)

Abstract: In view of the current situation of labor force shortage in famous tea picking, this paper designs a robot for famous tea picking, which is suitable for natural environment. The robot is composed of picking module, 3P-Delta manipulator, vision system and controlling system. The robot captures the image of tea canopy using RGB-D camera, and then calculates the picking points by deep learning model and the skeleton method. Based on the growth characteristics of famous tea, the picking trajectory model of the manipulator was established. The Bézier curve was used to optimize the picking path of tea, which effectively alleviated the acceleration mutation caused by the rapid motion of the manipulator and improved the smoothness of the picking movement. The dynamic model of the manipulator was established by using the principle of virtual work, and the picking control algorithm of the manipulator is designed based sliding surface variable structure control. The exponential reaching law in the control algorithm is optimized, so that the chattering phenomenon in the sliding surface control is effectively suppressed in the process of rapid reaching. The field test results show that the picking robot can realize the picking of famous tea in the natural environment, and the picking rate and integrity rate are 75.53% and 54.68%, respectively. The average picking speed of the robot is 0.451/s.

Key words: picking robot; famous tea; 3P-Delta manipulator; Bézier curve; sliding mode control; system integration

^{*} 国家自然科学基金(51975537, 52105284)、浙江省领雁计划(2022C02052)和
财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目。20220610
收到初稿, 20220816收到修改稿

0 前言

作为我国重要的经济作物, 茶叶产业对区域农业经济发展有着重大意义^[1]。名优茶采摘具有标准高、季节性强等特点, 目前仍以人工采收为主, 采茶工劳动强度大, 在采摘季往往出现采茶工短缺的困境^[2]。随着国内对名优茶需求的不断增加以及人口老龄化情况的加剧, 名优茶采摘与劳动力之间的矛盾日益突出, 名优茶智能化采摘势在必行。实现名优茶精细化采摘需要解决茶芽识别、精准采摘控制、自主导航等关键性问题, 成为了制约当前名优茶采摘的技术瓶颈^[3-4]。随着机器视觉与深度学习的快速发展和应用, 针对茶叶识别的研究已经有了长足的进步, 在自然环境下已经能够实现茶叶的有效识别和定位^[5-8], 为名优茶智能化采摘提供了重要的理论依据。

近年来随着对茶叶采摘技术研究的深入, 研究者开始针对名优茶采摘机器人进行相关研究。汪琳^[9]提出了一种基于多 SCARA 机械臂的名优茶采摘方案, 在对机械臂建模的基础上, 提出了一种自适应鲁棒 PD 控制算法, 并设计了一种小型滑槽杠杆式末端采摘手。汤一平等^[10]研制了一种基于机器视觉的智能采茶机, 采用切割式的采收原理, 利用视觉和倾斜传感器实时控制割台与茶垄蓬面之间的深度, 实现茶叶精准切割。杨化林等^[11]设计了一种并联式自动采茶机, 该机器基于双目视觉的定位方案, 通过 SVM 方法获取目标茶芽的平面坐标, 并利用双目视觉合成茶芽的空间坐标, 通过并联机构带动末端采摘机构, 但尚未进行名优茶的实地采摘试验。

茶叶采摘的精度和速度决定了机器人是否能够胜任采摘任务。轨迹方向的突变会影响机械臂的动态特性, 降低采摘作业的质量。BOUDJEDIR 等^[12]通过使用非线性微分控制取代 PD 控制的方式, 设计了混合非线性比例微分滑模控制器, 其具备了两者的优点, 提高了收敛速度的同时增强了鲁棒性。LUIS 等^[13]设计了一种自适应控制器, 解决了 Delta 机械臂动力学模型的不确定性给控制器带来的影响。NGUYEN 等^[14]提出了一种基于计算扭矩的混合补偿控制方法, 能够在高速动作下保持末端平稳。

本文提出并设计了一种适用于自然环境下作业的名优茶智能采摘机器人。在茶叶采摘点定位的基础上, 通过对 3P-Delta 机械臂的采摘轨迹和控制策略进行优化, 实现了名优茶的快速精准采摘, 并通过实地测试验证此设计的可行性, 为名优茶的精准化采摘提供了解决方案。

1 系统整体设计

1.1 茶叶生长特征分析

我国超过六成茶园分布于丘陵山区, 茶园地势高低不平, 且在建立之初并未考虑大规模机械化采摘, 导致当前国内茶园的结构尺寸参差不齐, 规范化程度低。通过对浙江省内的主要茶园进行实地测量后发现, 茶垄普遍高度为 1 100 mm, 宽度为 1 000~1 200 mm, 名优茶的普遍生长于茶垄蓬面附近, 绝大部分茶芽生长高度差为 80 mm。如图 1 所示。

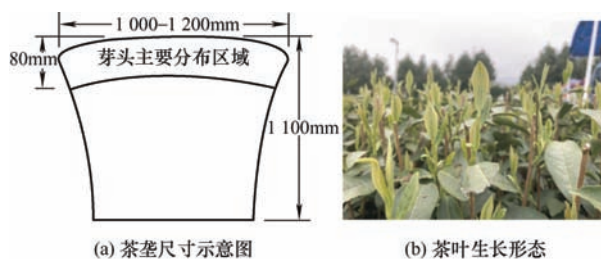


图 1 茶叶采摘环境

名优茶的采摘形态主要为单叶、一芽一叶和一芽二叶。与大宗茶“一刀切”式的采摘方式不同, 名优茶的制作工艺决定了其必须进行过精准化采摘, 而茶芽采摘目标小, 生长环境复杂, 采摘时间窗短等一系列因素, 对机械臂控制的速度和精度都提出了更高的要求。

1.2 机器人结构设计

采摘机器人采用龙门架的结构形式, 考虑到茶园地形对机器人通过性的影响, 采用导轨引导的方式实现机器人沿垄运动, 通过对导轨进行找平处理, 消除了由机器人倾斜所造成的定位精度下降, 系统整体结构如图 2 所示。

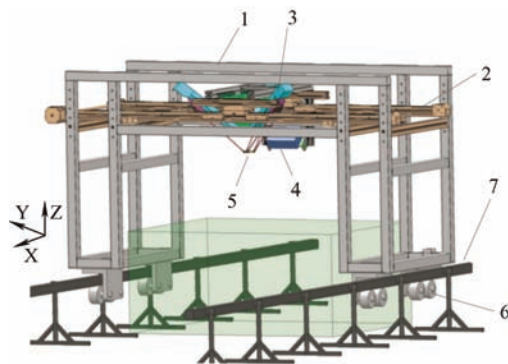


图 2 采茶机器人整体结构

1. 龙门架 2. 移动滑台 3. 机械臂 4. 深度相机
5. 采摘机械手 6. 行走机构 7. 导轨

机器人结构可分为两部分, 底部行走机构和龙门架组成了机器人的主体结构, 负责机器人整体沿茶垄

X 方向运动, 采摘平台集成了采摘机械手、收集装置和相机, 负责茶叶采收作业。平台纵向放置于移动滑台上, 并通过直线电机实现 Y 方向上的精准平移。

相机安装在采摘平台下方 300 mm 处, 相机呈 40° 俯视茶垄, 与茶叶蓬面保持在 500 mm 左右的最佳工作距离。机械臂位于相机正前方, 调整高度使其工作空间最大化, 如图 3 所示。

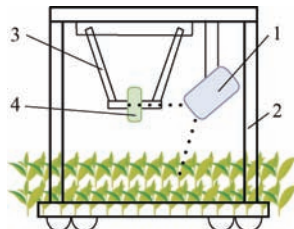


图 3 茶芽视觉识别示意图

1. 深度相机 2. 龙门架 3. 机械臂 4. 采摘末端

1.3 采摘机械手的设计

名优茶采摘要求机械臂在精确定位的基础上, 兼具平稳、轻便的特性。相较于串联臂, Δ 机械臂具有重复定位精度高、运动速度快、自重负荷比小等优点, 如图 4 所示。 Δ 机械臂通过三条支链共同作用于末端平台, 使其能够分摊茶叶采摘时产生的冲击负载, 从而提高采摘作业的速度^[15]。

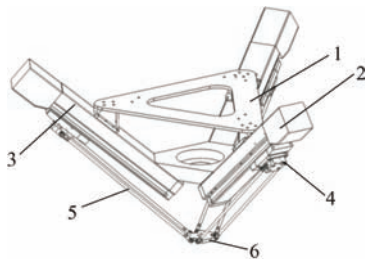


图 4 3P-Delta 机械臂结构图

1. 静平台 2. 伺服电机 3. 直线模组 4. 滑块
5. 双球铰链 6. 动平台

机械臂的工作空间与直线模组行程和球铰链长度有关, 而过大的尺寸会导致机器人重心不稳。结合茶垄尺寸和茶叶生长情况, 确定机械臂的基本尺寸参数如表 1 所示。

表 1 Δ 机械臂尺寸参数

参数	数值
工作空间(直径 \times 高度)/(mm \times mm)	400 \times 300
模组行程/mm	200
球铰杆长/mm	360
静平台半径/mm	260
动平台半径/mm	50
自由度	3

末端采摘机械手的设计需要同时考虑茶叶生长形态与机械臂运动特性。名优茶普遍生长于茶蓬下方 80 mm 范围内, 呈现出垂直向上的生长形态, 因此利用 3P-Delta 机械臂末端支架具有的平动特性, 采用自顶向下的采收方式, 末端机械手则采用套筒构型, 结构如图 5 所示。

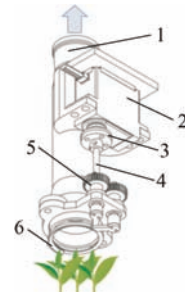


图 5 采摘机械手结构

1. 变径管结构 2. 舵机 3. 法兰 4. 传动轴
5. 正反齿传动机构 6. 圆弧刀片

末端机械手由变径管套筒、切割机构和负压装置组成。其中负压装置通过波纹管与变径管套筒连接, 负压装置在变径管一侧产生负压, 气压通过变径管的回路在采摘侧产生特定负压气场, 使芽叶在负压作用下聚拢并向管口方向靠近。负压装置中包含了茶芽收集功能, 当茶芽被剪下后, 在负压作用下自动进入上端的收集盒中^[16]。

1.4 采摘点定位

自然环境下茶芽目标过小、颜色与背景相近、形态多样化以及遮挡等因素都会对茶芽识别造成一定影响^[17]。采用双目视觉的定位方案依赖于目标的特征纹理, 而在自然环境中, 光照、遮挡等因素都会影响茶叶特征的提取和匹配, 造成测量误差。本文采用结构光深度相机获取茶垄的 RGB-D 图像, 考虑到识别精度和识别速率之间的平衡, 采用 YOLOv3 模型实现茶芽识别^[18]。

为了能够更加全面地提取茶芽特征, 提高识别模型的泛化能力, 采用 DenseNet 作为 YOLOv3 模型的特征提取网络, DenseNet 中每一层卷积网络均与其余各层建立连接, 通过各层之间的密集连接实现特征重用, 在减少参数和计算量的同时, 提高网络的识别性能。不同角度的茶芽在自然环境中呈现出不同的外观和形状差异, 采用单一标签往往需要大量样本进行训练, 才能获取较高的召回率。通过设计双标签法, 分别以茶芽正视图和侧视图为标准进行标注训练, 双标签法使训练模型的特征更加集中, 能够在训练样本不足的情况下获得较为理想的精准率和召回率, 芽叶的识别结果如图 6 所示。

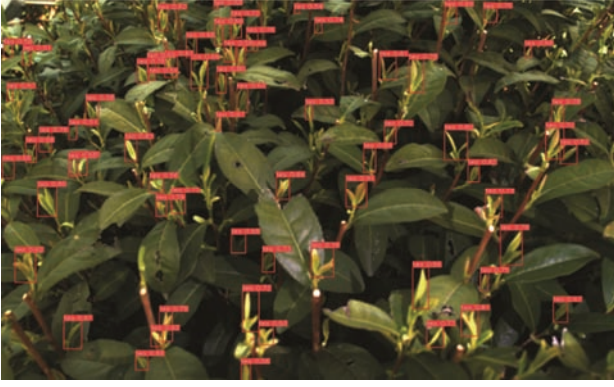


图 6 芽叶识别结果

识别模型只能输出矩形目标，包含了芽头目标和部分背景信息，导致芽头采摘点难以提取。为消除背景干扰，提高采摘点的定位精度，获取茶芽目标框后，利用相邻像素间深度信息的连续性特征，通过深度阈值法获取茶叶目标曲面，结合点云信息进一步特征茶芽形态的边界特征点，并将特征点连接得到茶芽的骨架，最后根据茶芽的形态学确定最优的剪切点。

2 采摘机械臂的建模与控制

机械臂对茶叶进行快速采摘过程中，机器人本身的惯性力也在不断增加，这导致系统整体稳定性下降，影响机械臂的控制精度^[19]，最终影响名优茶的采摘效果。传统的控制方法虽然能够实现机械臂的快速运动控制，但需要对机械臂精确建模，且机械臂在快速采摘动作过程中不可避免地存在摩擦力以及外部干扰。针对上述问题，本文采用对建模误差灵敏滑模控制策略。

2.1 机械臂逆运动学建模

采摘机械臂动力学分析如图 7 所示，其中等边三角形 $\triangle A_1A_2A_3$ 和等边三角形 $\triangle E_1E_2E_3$ 分别代表静平台和动平台，其中点 O 和 O' 与平台顶点之间的距离分别为 R 和 r 。 $A_iB_iC_iD_i$ 为第 i 组直线滑块模组，其中 B_iD_i 为滑块，模组与静平台所在平面的夹角为

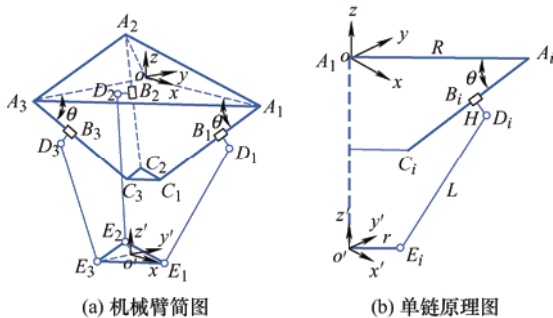


图 7 采摘机械臂动力学分析图

θ ，模组通过并联杆件 D_iE_i 连接动平台。取某一单链 i 进行分析，以 O 点为原点建立笛卡儿坐标系 $Oxyz$ 。

根据连杆之间的几何关系可知单一链得回路方程如下所示

$$R\mathbf{t}_i + d_i\mathbf{s}_i + H\mathbf{k}_i + L\mathbf{e}_i - r\mathbf{t}_i - \mathbf{p} = 0 \quad (1)$$

式中， \mathbf{t}_i 、 \mathbf{s}_i 、 \mathbf{k}_i 、 \mathbf{e}_i 分别为 OA_i 、 A_iC_i 、 B_iD_i 、 D_iE_i 方向的单位向量， d_i 为第 i 个滑块的线性位移。

根据式(1)整理可得

$$L\mathbf{e}_i = \mathbf{p} - (R-r)\mathbf{t}_i - d_i\mathbf{s}_i - H\mathbf{k}_i \quad (2)$$

将式(2)的两边点乘自身，分别展开可得

$$\begin{aligned} L^2 = & \mathbf{p}^T + (R-r)^2 + d_i^2 + H^2 - 2(R-r)\mathbf{p}^T\mathbf{t}_i - \\ & 2d_i\mathbf{p}^T\mathbf{s}_i - 2H\mathbf{p}^T\mathbf{k}_i + 2d_i(R-r)\mathbf{t}_i^T\mathbf{s}_i + \\ & 2H(R-r)\mathbf{t}_i^T\mathbf{k}_i + 2d_iH\mathbf{s}_i^T\mathbf{k}_i \end{aligned} \quad (3)$$

根据图 7 可知 \mathbf{s}_i 与 \mathbf{k}_i 垂直，即 $\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{k}_i = 0$ 。对式(3)化简并整理可得 d_i 的关系式

$$d_i^2 - Ad_i + B = 0$$

其中 $A = 2(\mathbf{p}^T + r\mathbf{t}_i^T - R\mathbf{t}_i^T)\mathbf{s}_i$ ， $B = \mathbf{p}^T + (R-r)^2 + H^2 - 2(R-r)\mathbf{p}^T\mathbf{t}_i - 2H\mathbf{p}^T\mathbf{k}_i + 2H(R-r)\mathbf{t}_i^T\mathbf{k}_i$ 。对上式进行求解可得

$$d_i = \frac{A \pm \sqrt{A^2 - 4B}}{2} \quad (4)$$

对于确定的末端坐标 \mathbf{p} ，代入式(4)可分别获得滑块的两组位移，接着根据滑块的行程获得位移的唯一解。

2.2 机械臂动力学建模

将式(1)对时间求导并整理可得动平台加速度表达式

$$\ddot{\mathbf{p}} = \ddot{q}_i\mathbf{s}_i + L[\alpha_i \times \mathbf{e}_i + \omega_i \times (\omega_i \times \mathbf{e}_i)] \quad (5)$$

式中， $\ddot{\mathbf{p}}$ 为动平台的加速度， \ddot{q}_i 为第 i 个滑块的加速度。对式(5)进行整理可得滑块加速度关系式

$$\ddot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}_{fwd}\ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{U}_q \quad (6)$$

式中， \mathbf{J}_{fwd} 为机械臂正向运动学雅可比矩阵，同时还可以得到连杆的速度与加速度关系式

$$\begin{bmatrix} \omega_i \\ \mathbf{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\omega i} \\ \mathbf{J}_{\mathbf{v} i} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_i \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \beta_i \\ \mathbf{a}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\beta i} \\ \mathbf{J}_{\mathbf{a} i} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} - \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\beta i} \\ \mathbf{U}_{\mathbf{a} i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, ω_i 和 β_i 分别为连杆角速度和角加速度, $[J_{\omega i}, J_{v i}]^T$ 和 $[J_{\beta i}, J_{a i}]^T$ 分别代表第 i 组连杆与动平台的速度和加速度雅可比矩阵。

考虑到机械臂控制的实时性要求, 采用计算量较少的虚功原理进行动力学建模, 根据机械臂结构(图 4)可知, 其动力学特性受动平台、电机转子、滑块以及连杆的影响。在此基础上, 采用达朗贝尔形式建立方程

$$\sum_{i=1}^3 \delta \mathbf{x}_i^T \mathbf{F}_i + \delta \mathbf{x}_p^T \mathbf{F}_p + \delta \mathbf{x}_q^T \mathbf{F}_q + \delta \mathbf{x}_m^T \mathbf{N} = 0 \quad (9)$$

式中, $\delta \mathbf{x}_i$ 、 $\delta \mathbf{x}_p$ 、 $\delta \mathbf{x}_q$ 、 $\delta \mathbf{x}_m$ 分别连杆、动平台、滑块以及电机转子的虚位移。在静平台坐标系下, 分别对动平台、电机转子、滑块和连杆进行动力学建模, 推导各部件在空间的加速度与所受外力与力矩之间的关系方程。由于文章篇幅有限, 略去推导过程。

(1) 连杆。

以连杆质心为研究对象, 其运动过程存在平移和旋转分量, 且所受外力仅为重力。因此第 i 根连杆质心的受力方程整理如下

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_i \\ \mathbf{n}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i \mathbf{g} - m_i \mathbf{a}_i \\ {}^\circ \mathbf{I}_i \boldsymbol{\beta}_i - \boldsymbol{\omega}_i \times ({}^\circ \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, m_i 为第 i 根连杆的质量, ${}^\circ \mathbf{I}_i$ 为第 i 根连杆的惯性张量, 将式(8)代入式(10)可得连杆的动力学方程如下

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_i \\ \mathbf{n}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i (\mathbf{g} - \mathbf{J}_{a i} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{U}_{a i}) \\ {}^\circ \mathbf{I}_i (\mathbf{J}_{\omega i} \ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{U}_{\beta i}) - \boldsymbol{\omega}_i \times ({}^\circ \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i) \end{bmatrix} \quad (11)$$

(2) 动平台。

动平台受到末端外力和自身重力影响, 其质心的动力学方程如下

$$\mathbf{F}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_p \\ \mathbf{n}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_e + m_p (\mathbf{g} - \ddot{\mathbf{p}}) \\ \mathbf{n}_e - {}^\circ \mathbf{I}_p \boldsymbol{\beta}_p - \boldsymbol{\omega}_p \times ({}^\circ \mathbf{I}_p \boldsymbol{\omega}_p) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, \mathbf{f}_p 和 \mathbf{n}_p 为末端作用于动平台质心的力和力矩, m_p 为动平台的质量。由于 Delta 机械臂只有三个方向的平动自由度, 则在式(12)中 $\boldsymbol{\omega}_p$ 和 $\boldsymbol{\beta}_p$ 均为 0, 同时将式(6)代入式(12)中整理可得动平台的动力学方程如下

$$\mathbf{F}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_p \\ \mathbf{n}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_e + m_p (\mathbf{g} - \mathbf{J}_{f v d} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{U}_q) \\ \mathbf{n}_e \end{bmatrix} \quad (13)$$

(3) 滑块。

滑块在直线模组上做平移运动, 因此运动过程中不存在力矩, 其所受外力只有重力因素, 因此滑块的动力学方程如下

$$\mathbf{F}_q = m_q (\mathbf{g} - \ddot{\mathbf{q}}) \quad (14)$$

式中, m_q 为滑块质量。

(4) 电机转子。

作用于第 i 个电机上的力矩可以表示为

$$\mathbf{N} = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{I}_{MCD} \boldsymbol{\alpha}_M \quad (15)$$

式中, $\boldsymbol{\tau}$ 为电机输入扭矩, \mathbf{I}_{MCD} 为电机惯性张量矩阵。

由式(6)和(7)可分别得连杆和动平台与滑块之间的虚位移关系式

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x}_i^T &= \delta \mathbf{x}_q^T \mathbf{J}_{v o i}^T \\ \delta \mathbf{x}_p^T &= \delta \mathbf{x}_q^T \mathbf{J}_{f v d}^T \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\mathbf{J}_{v o i} = [\mathbf{J}_{v i}, \mathbf{J}_{\omega i}]^T$ 。根据电机的构造可得电机转子与动平台的虚位移关系式

$$\delta \mathbf{x}_m^T = \delta \mathbf{x}_q^T \mathbf{J}_{f v d}^T \mathbf{Q}^T \quad (17)$$

式中, \mathbf{Q}^T 为电机结构参数, 将式(16)和式(17)代入式(9)可得

$$\delta \mathbf{x}_q^T (\mathbf{J}_{f v d}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{N} + \mathbf{F}_q + \sum_{i=1}^3 \mathbf{J}_{v o i}^T \mathbf{F}_i + \mathbf{J}_{f v d}^T \mathbf{F}_p) = 0 \quad (18)$$

对于任意 $\delta \mathbf{x}_q^T$, 式(18)均成立。则可得

$$\mathbf{J}_{f v d}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{N} + \mathbf{F}_q + \sum_{i=1}^3 \mathbf{J}_{v o i}^T \mathbf{F}_i + \mathbf{J}_{f v d}^T \mathbf{F}_p = 0 \quad (19)$$

将式(11)、(13)、(14)代入式(19)整理可得采摘机械臂的动力学方程

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}(\mathbf{q}) \quad (20)$$

式中, $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为惯性项; $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为速度项; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 为重力项; $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ 为负载项, 方程各项参数如表 2 所示。

表 2 动力学方程参数表

参数项	表达式
$\mathbf{M}(\mathbf{q})$	$\mathbf{Q}^T \mathbf{J}_{f v d}^{-T} \left(m_q + \sum_{i=1}^3 \mathbf{J}_{v o i}^T \left[\begin{matrix} m_i \mathbf{J}_{a i} \\ -{}^\circ \mathbf{I}_i \mathbf{J}_{\omega i} \end{matrix} \right] + \begin{bmatrix} m_p \mathbf{J}_{f v d} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{I}_{MCD} \mathbf{Q} \ddot{\mathbf{q}}$
$\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$	$\mathbf{Q}^T \mathbf{J}_{f v d}^{-T} \left(\sum_{i=1}^3 \mathbf{J}_{v o i}^T \left[\begin{matrix} -m_i \mathbf{U}_{a i} \\ {}^\circ \mathbf{I}_i \mathbf{U}_{\beta i} + \boldsymbol{\omega}_i \times ({}^\circ \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i) \end{matrix} \right] + \begin{bmatrix} -m_p \mathbf{U}_q \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right)$
$\mathbf{G}(\mathbf{q})$	$-\mathbf{Q}^T \mathbf{J}_{f v d}^{-T} \left(m_q \mathbf{g} + \sum_{i=1}^3 \mathbf{J}_{v o i}^T \left[\begin{matrix} m_i \mathbf{g} \\ \mathbf{0} \end{matrix} \right] + \begin{bmatrix} m_p \mathbf{g} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right)$
$\mathbf{D}(\mathbf{q})$	$-\mathbf{Q}^T \mathbf{J}_{f v d}^{-T} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_e \\ \mathbf{n}_e \end{bmatrix}$

2.3 滑模轨迹跟踪控制

对机械臂进行滑模控制的方式能够有效减少外界干扰和动力学建模所带来的精度误差, 但其容易在滑模面附近发生抖振现象。因此需要对滑模控制的趋近律进行设计, 使系统能够在快速趋近滑模面的同时削弱抖振。设计系统的滑模面如下

$$s = \dot{e}_q + \lambda e_q \quad (21)$$

式中, e_q 为直线滑块的运动差, λ 为系统常数项。指数趋近率中的不连续项会引起模态在近原点处发生抖振, 为解决此问题, 本文将系统状态误差引入常规指数趋近律当中, 采用设计指数趋近律为^[20]

$$\dot{s} = -As - \frac{\varepsilon}{B} \text{sgn}(s), \varepsilon > 0 \quad (22)$$

式中, $A = \rho|E|^a$, $B = \eta + (1 + |E| - \eta)e^{-\lambda|s|}$, $\varepsilon > 0$, $\rho > 0$, $\lambda > 0$, $a > 0$, $0 < \eta < 1$, E 为系统状态误差, 且满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} |E| = 0$ 。当系统 $|s|$ 较大时, 此时系统远离滑模面, 滑模趋近速度为 $\rho|E|^a$, 大于常规指数趋近律的增益, 加快了系统的趋近速度; 当系统 $|s|$ 较小时, 趋近律函数接近 $(\varepsilon|E|)/(|E| + 1)$, 并随系统误差的减小趋近于零, 能有效地减弱机械臂的抖振。

选取 Lyapunov 函数 $V(s) = \frac{1}{2} s^T s(t)$ 验证系统的稳定性, 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(s) = s\dot{s} = & -As^2 - \frac{\varepsilon}{B} \text{sign}(s)s = \\ & -(\rho|E|^a + \frac{\varepsilon e^{\lambda|s|}|E|}{1 + |E|})s^2 < 0 \end{aligned} \quad (23)$$

即此设计满足滑模变结构控制的稳定性要求。对式(21)求导并与式(23)联立可得

$$\ddot{d} = \ddot{d}_{ref} + \lambda \dot{e}_d + Ms + N \text{sgn}(s) \quad (24)$$

式中, $M = \rho|e_d|^a$, $N = \frac{\varepsilon|E|}{1 + |E|} e^{\lambda|s|}$ 。将式(24)代入式(20)可得到机械臂的滑模变结构控制函数

$$\begin{aligned} \tau = & M(d)(\ddot{d}_{ref} + \lambda \dot{e}_d + Ms + N \text{sgn}(s)) + \\ & V(d, \dot{d})\dot{d} + G(d) + D(d) \end{aligned} \quad (25)$$

2.4 采摘轨迹规划

机器人确定芽叶的采摘坐标后, 按照采摘策略进行轨迹规划, 并控制 Delta 机械臂运动。机械臂运动轨迹为“门”字型路径, 当机械臂运动到芽叶上方一定距离后, 垂直套入目标。为提高机械臂的采摘效率, 防止机械臂在路径交界点产生的运动跳跃, 采用

Bézier 曲线对机械臂采摘轨迹进行改进, 使机械臂运动过程变得更加平滑^[21], Bézier 曲线方程式如下

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t)P_i, t \in [0, 1] \quad (26)$$

式中, P_i 为位置点, $B_{i,n}(t)$ 为 n 阶 Bernstein 基函数, 其具体表示如下

$$B_{i,n}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i} \quad (27)$$

以“门”字型采摘轨迹为例, 分别将机械臂运动起点、终点和两个拐角点作为控制点, 依次形成 3 条折线。给定 $t=t_0$, 按照 $t_0: 1-t_0$ 的比率从每条折线上取出 4 个新的控制点, 并依次连接形成新的折线, 以此类推, 可以得到 Bézier 曲线递推公式

$$\begin{aligned} P_i^{(0)} &= P_i, i = 0, 1, 2, 3 \\ P_i^{(1)} &= t_0 P_{i+1}^{(0)} + (1-t_0) P_i^{(0)}, i = 0, 1, 2 \\ &\vdots \\ P_0^{(3)} &= s(t_0) \end{aligned} \quad (28)$$

对于一条采摘轨迹而言, 其在 $[0, t_0]$ 和 $[t_0, 1]$ 区间内存在两组共 8 个控制点构成完整的采摘路径, 分别为

$$\begin{aligned} [0, t_0]: & P_0^{(0)}, \dots, P_0^{(3)} \\ [t_0, 1]: & P_3^{(0)}, \dots, P_0^{(3)} \end{aligned} \quad (29)$$

对 Bézier 曲线进行求导可以获得采摘轨迹的速度和加速度曲线, 其中控制点为常数, 因此只需对 $B_{i,n}(t)$ 进行求导, 采摘速度与加速度曲线如下

$$\begin{cases} P'(t) = \sum_{i=0}^{n-1} B_{n-1,i}(t)Q_i \\ P''(t) = \sum_{i=0}^{n-2} B_{n-2,i}(t)((n-1)(Q_{i+1} - Q_i)) \end{cases} \quad (30)$$

式中, $Q_i = n(P_{i+1} - P_i)$, 视觉识别系统在计算出芽头采摘点后, 机器人根据“门”字型采摘策略生成 4 个控制点, 将控制点代入式(28)和式(30)生成机械臂运动参数。

分别利用 Bézier 曲线和直线圆弧插补法对机械臂采摘“门”字型轨迹进行规划, 构建采摘末端的运动规律, 并将规划点带入机械臂逆运动学求解各关节运动轨迹, 结果如图 8 所示。

由结果可知, Bézier 曲线优化下的关节速度与加速度曲线均未出现突变现象。而采用直线圆弧插补法优化的曲线, 在采摘路径衔接处出现了明显的跳变, 引起末端采摘手的振动, 影响采摘效果。因此 Bézier 曲线能够很好地避免上述问题, 减少由于速度突变对机械臂造成的冲击, 提高机械臂在快速采摘作业过程中的稳定性。

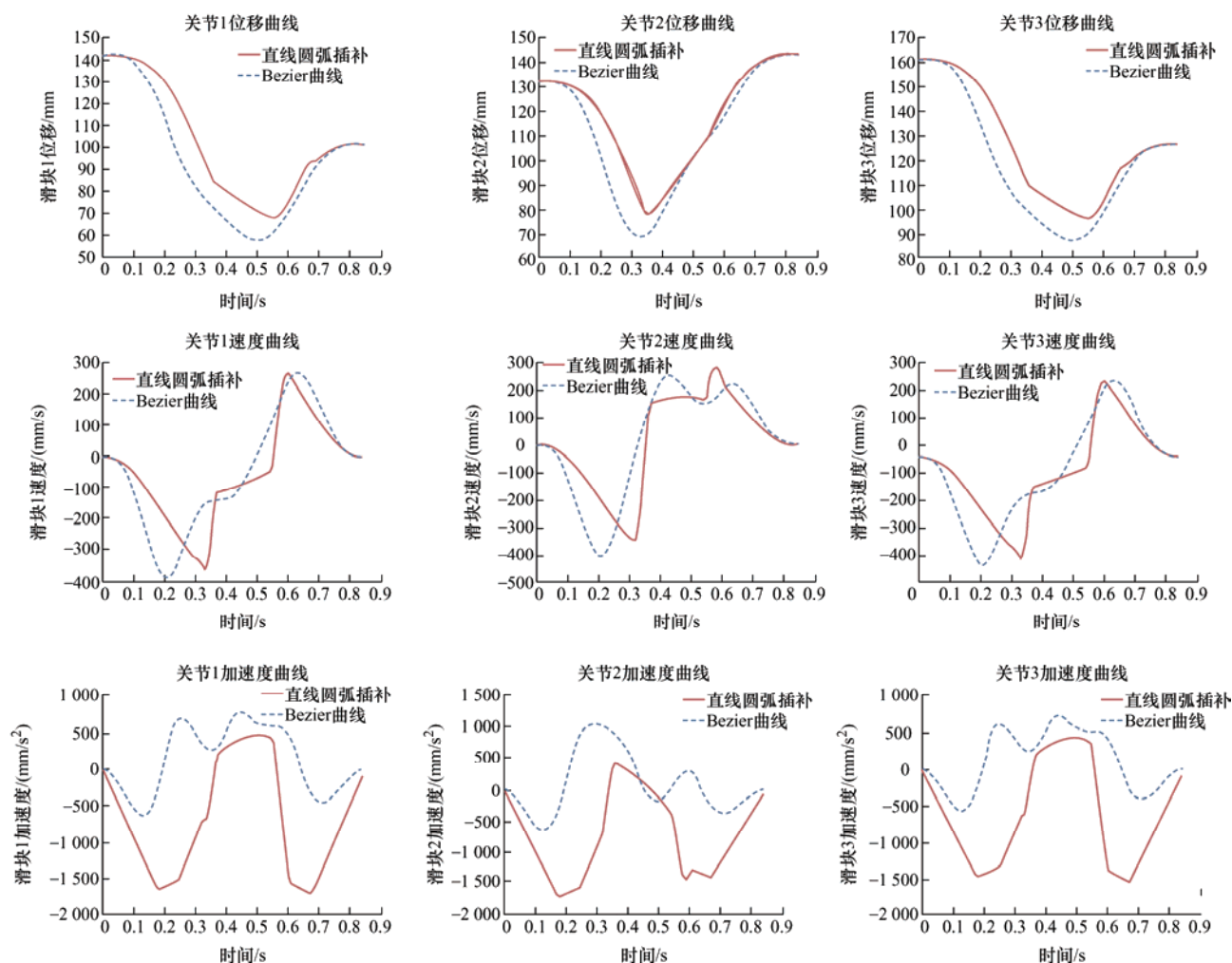


图 8 机械臂三关节运动轨迹

3 采摘试验与结果分析

3.1 采摘试验平台

采摘机器人系统由导轨式动平台、并联式机械臂、末端机械手、视觉识别系统和主控计算机组成,系统硬件架构如图 9 所示。动平台、机械

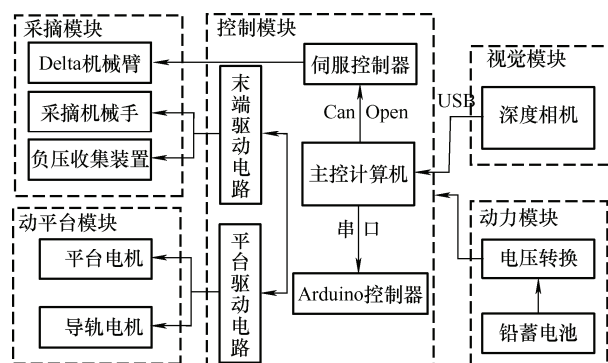


图 9 采摘机器人硬件架构图

臂与末端机械手的控制部分均集成在电控柜当中,电控柜通过网口和串口与主控计算机进行通信。

为了实现茶芽的自动化识别和采摘收集,同时提高采摘效率和采摘成功率,将各个子系统进行整合,设计并编写了自动化茶叶采摘控制系统。系统设计有自动采摘模式、学习模式和调试模式。自动模式为机器人主要的运行模式,机器人在该模式下运行茶叶自动化采摘作业,自动采摘模式的流程图如图 10 所示。当机器人对茶叶茶芽的识别率过低时,可以通过进入学习模式,向识别模型中导入新的数据更新识别模型,使模型具有更强的泛化能力。在调试模式下,机器人各部件能够独立的运行,并能在用户界面输出调试信息。

通过计算采摘空间,在移动滑台固定 5 个拍照点,使得采摘平台能覆盖整个茶垄蓬面。当采摘平台运动到某一拍照位置时,深度相机获取冠面

RGB-D 图像, 随后将图像送入识别模型, 获得相机坐标系下的茶芽剪切点, 随后该坐标变换为机械臂坐标系下的空间点, 其变换公式如下

$$\begin{bmatrix} {}^R P_x \\ {}^R P_y \\ {}^R P_z \end{bmatrix} = {}^R T_C {}^C P = \begin{bmatrix} {}^R R_C & {}^R t_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^C P_x \\ {}^C P_y \\ {}^C P_z \end{bmatrix} \quad (31)$$

式中, ${}^R T_C$ 为相机坐标系到机械臂坐标系的齐次变换矩阵。该矩阵由机械臂和相机的相对位姿决定, 在机器人安装完毕后标定得到。获取到机械臂坐标系下的采摘点后, 机器人首先根据机械臂工作区间剔除超出范围的点, 并将超出范围的目标暂存入待采摘队列, 参与下一个拍照点的采摘流程, 最后机器人将控制机械臂对剩余目标进行采摘。

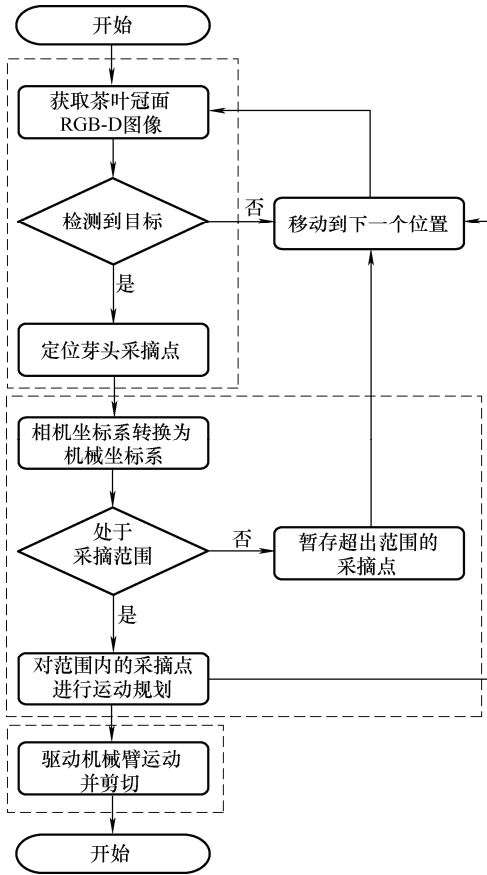


图 10 自动采摘模式流程图

机器人控制界面基于 Windows 平台进行开发, 采用 QT5.0 实现用户交互界面, 如图 11 所示。采用模块化分层构建名优茶采摘机器人平台架构, 将底层驱动软件和上层算法相隔离, 统一各子系统间数据的采集和控制, 并利用多线程机制实现系统各部件的独立执行。



图 11 控制软件界面

3.2 轨迹跟踪控制试验

在机械臂工作空间内随机选取起始点和采摘点, 利用试验平台控制机械臂进行“门”字型运动来模拟真实采摘过程, 并在机械臂运动过程中, 每隔 10 ms 对三个关节的状态进行记录。分别采用基于动力学模型的滑模控制与 PID 控制方法对机械臂采摘过程进行跟踪, 分别得到两者的跟踪误差, 取其中一次采摘动作进行比较, 如图 12、13 所示。

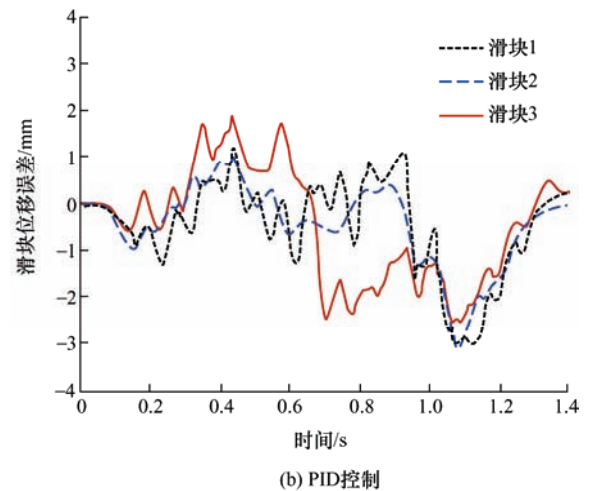
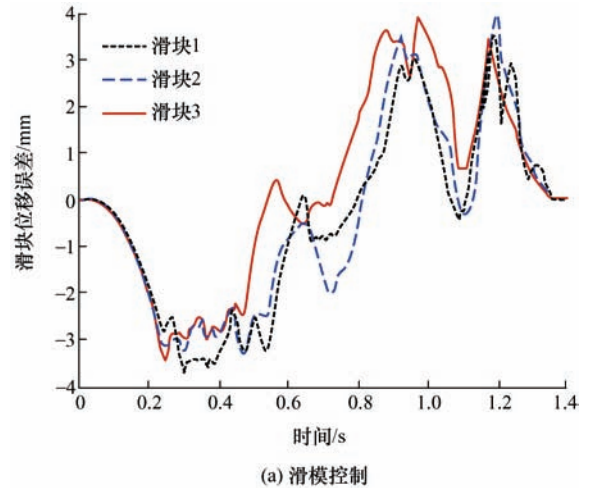


图 12 跟踪误差对比

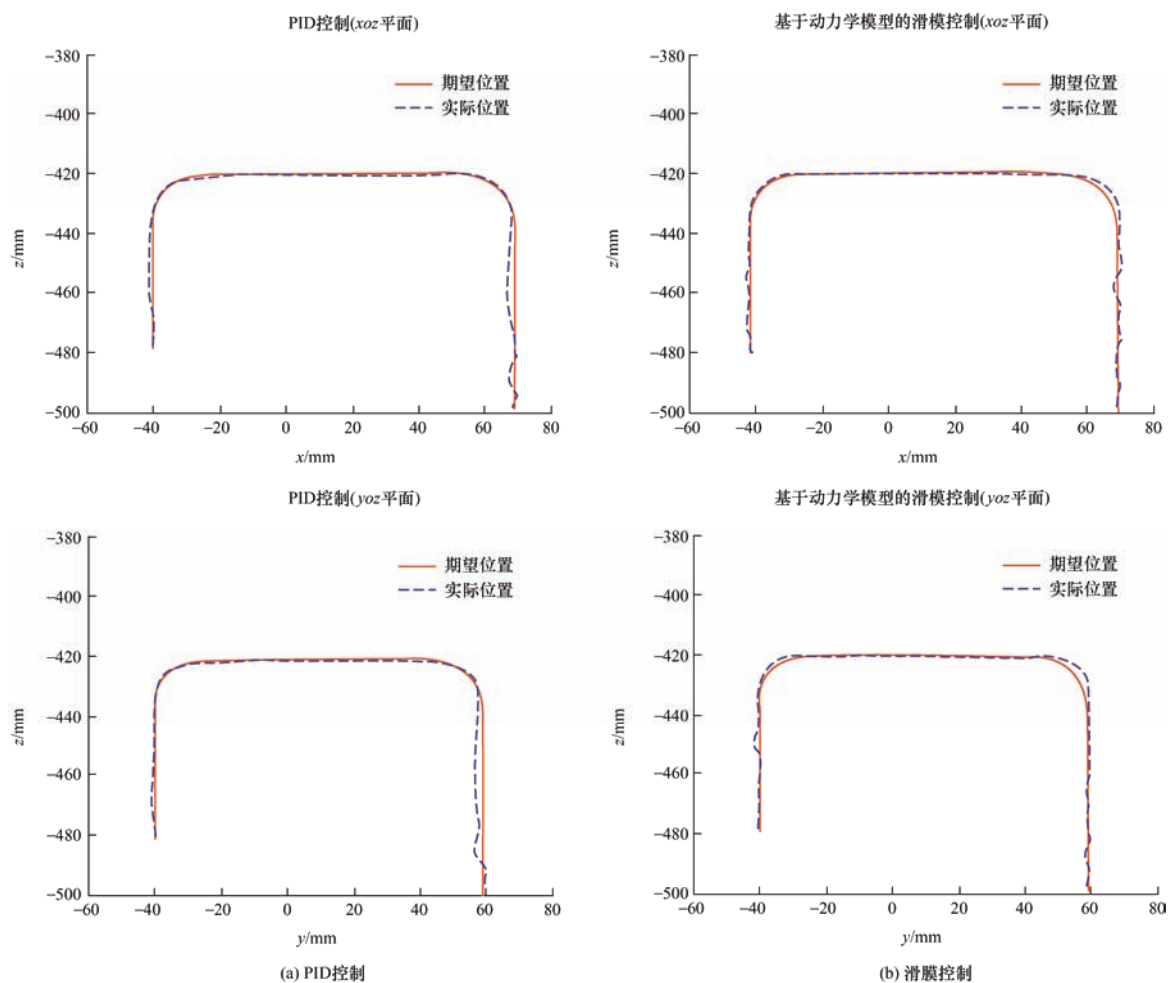


图 13 运动轨迹对比

从采样结果可以看出,在滑模控制策略下的机械臂关节运动的总体误差范围保持在 3 mm 内,相比于 PID 控制误差的波动更小,两者的最大误差均出现在采摘轨迹的拐角点。由于机械臂的惯性,两者在启动阶段均出现了位移滞后现象,其中滑模控制策略下的滞后较弱,体现出了更好的轨迹跟随性。在机械臂下探阶段,滑模控制策略能够更加贴合既定轨迹,能够引导芽叶进入套筒。

3.3 机器人综合采摘试验

试验选地位于浙江省嵊州市的中茶所实验基地内,选择“龙井 43”作为采摘试验品种,随机选取一陇茶叶进行试验。茶垄宽度约为 1.5 m,陇间距约为 0.6 m。在两陇间铺设小型钢制导轨,铺设长度为 80 m,导轨通过梯形支架支撑,保证上方采摘机器人的平稳运行,采摘机器人实物如图 14 所示。

设计名优茶采摘试验,测试机器人在自然环境中的综合采摘性能,全面评估采摘机器人的适应性。以“拍照-识别-采摘-统计”作为一个标准试验流程,在每次试验流程结束后对采摘结果进行统计,如图 15 所示。



图 14 茶园试验中的采摘机器人



图 15 单一流程的采摘结果

记录每次试验中识别芽头目标数 R 和末端剪下茶芽数 S ，每次采摘结束后对收集盒内茶芽进行筛选统计，统计完整茶芽数 Q ，分别计算采摘率和完整率。采摘试验分为 20 组，每组测试 4 轮，每轮采摘流程测试茶垄长度为 300 mm，轮次间采摘区域互不重叠，统计结果如表 3 所示。

表 3 综合采摘试验统计表

统计参数	测试组次					合计
	1~4 组	5~8 组	9~12 组	13~16 组	17~20 组	
识别数 R	817	851	873	868	850	4259
采摘数 S	622	639	654	657	645	3217
完整数 Q	472	472	458	476	451	2329
采摘率 (%)	76.13	75.09	74.91	75.69	75.88	75.53
完整率 (%)	57.77	55.46	52.46	54.84	53.06	54.68

根据试验结果可以看出，在识别目标芽叶后，机械臂的采摘率为 75.53%，完整率为 54.68%。分析采摘失败的原因，主要为茶芽与老梗分布交错密

集，末端套筒在下探过程中容易于老梗一起套入末端，对剪切成功率造成了影响；部分芽叶分叉过大，超过了套筒的投影面积，机械臂下探速度过快导致部分芽叶无法及时通过负压引导吸进末端套筒，如图 16 所示。



图 16 采摘失败情况

通过设置轨迹规划时间测试机器人在不同速度下的采摘效果。试验分为 20 组进行采摘，每组采摘距离为 500 mm，分别记录茶芽识别数 R 、采摘完整率 P_Q 和流程所花时间 T ，统计结果如表 4 和图 17 所示。

表 4 采摘速度试验统计表

组别	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组	第 10 组
识别数	348	356	342	335	333	361	364	347	366	345
完整采摘数	192	194	191	184	184	196	198	190	195	175
采摘完整率 (%)	55.17	54.49	55.85	54.93	55.26	54.29	54.40	54.76	53.28	50.72
总耗时	6649	3755	2297	1684	1313	1199	1050	849	812	689
平均耗时/(棵/s)	0.052	0.095	0.149	0.199	0.254	0.301	0.347	0.409	0.451	0.501

组别	第 11 组	第 12 组	第 13 组	第 14 组	第 15 组	第 16 组	第 17 组	第 18 组	第 19 组	第 20 组
识别数	348	369	367	353	335	366	360	364	368	348
完整采摘数	172	175	172	114	81	64	35	21	14	6
采摘完整率 (%)	49.43	47.43	46.87	32.29	24.18	17.49	9.72	5.77	3.80	1.72
总耗时/t	638	616	568	504	443	460	428	406	384	351
平均耗时/(棵/s)	0.545	0.599	0.646	0.700	0.756	0.796	0.841	0.897	0.958	0.991

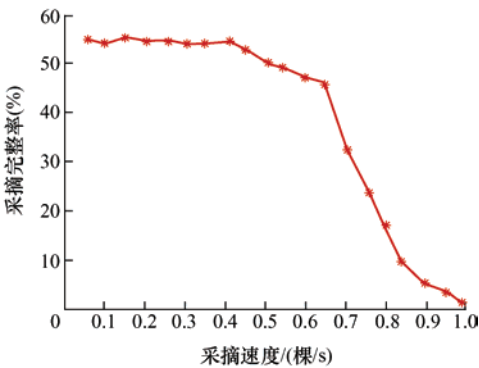


图 17 不同速度下的采摘完整率

由上图可以看出，当机械臂速度较慢时，系统采摘完整率平稳保持在 50%~55%，当速度超过 0.451 棵/s 后，采摘完整率逐渐开始下降，当速度超过 0.646 棵/s 后，完整率出现断崖式下降，已经无法满足名优茶采摘质量要求，因此采摘机器人需要在速度和作业质量之间寻找平衡点。

茶叶采摘完整率和速度决定了名优茶采摘机器人的应用效果。考虑到茶叶采摘的速度要求，系统未采用相对耗时的视觉伺服方案，通过机械臂控制算法和负压引导的方式较少采摘误差。从试验结果

表明,机器人的最高采摘速度可达 0.646 棵/s,能够在平均 0.451 棵/s 的采摘速度下维持约 54%的采摘完整率。

4 结 论

(1) 在分析名优茶生长特征的基础上,提出了针对性的名优茶采摘方案,设计并研制了一种名优茶智能化采摘机器人。该机器人能够适用于自然环境的作业,基于深度学习识别茶芽目标,并驱动机械臂实现了名优茶全自动采摘。

(2) 将 3P-Delta 机械臂应用于名优茶采摘当中,利用贝塞尔曲线对采摘轨迹进行优化,是机械臂各关节的速度与加速度实现连续运动,减少了运动过程中关节对机械臂的冲击。在对机械臂动力学建模的基础上,设计了适用于名优茶采摘的滑模变结构控制策略,提高了机械臂在采摘过程中的灵敏度和轨迹跟踪精度,提升了机械臂在快速采摘下能够保持动态稳定性。

(3) 通过在茶园实地试验对机器人的采摘效果进行了评估。结果显示机器人的采摘率为 75.53%,完整率 54.68%。平均采摘速率为 0.451 棵/s,最高采摘速度为 0.646 棵/s,为名优茶机械化采摘提供了一种行之有效的方案。

参 考 文 献

- [1] 陶德臣. 茶叶商帮崛起对茶叶经济发展的历史作用[J]. 中国茶叶, 2020, 42(2): 64-68.
TAO Dechen. Historical role of the rise of tea merchants in the development of tea economy[J]. Chinese Tea, 2020, 42(2): 64-68.
- [2] 陆德彪, 尹军峰. 我国名优绿茶机械化采摘的意义与实现路径[J]. 中国茶叶, 2018, 40(1): 1-4.
LU Debiao, YIN Junfeng. The significance and realization path of mechanized harvesting of famous green tea in China[J]. Chinese tea, 2018, 40(1): 1-4.
- [3] 黄藩, 王云, 熊元元, 等. 我国茶叶机械化采摘技术研究现状与发展趋势[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 48-51.
HUANG Fan, WANG Yun, XIONG Yuanyuan, et al. Research status and development trend of mechanized tea picking technology in China[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2019, 47(12): 48-51.
- [4] 韩余, 肖宏儒, 宋志禹, 等. 我国茶园机械化作业模式研究[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 74-81.
HAN Yu, XIAO Hongru, SONG Zhiyu, et al. Research on mechanized operation mode of tea gardens in China[J]. China Agricultural Science and Technology Report, 2016, 18(3): 74-81.
- [5] MUHAMMAD H A, ABDUL B. Weed detection in canola fields using maximum likelihood classification and deep convolutional neural network[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(4): 535-545.
- [6] JIANG Mingfu, CHEN Zhuo. Symmetry detection algorithm to classify the tea grades using artificial intelligence[J]. Microprocessors and Microsystems, 2021, 81(7): 103738.
- [7] QI Chao, GAO Junfeng, PEARSON S, et al. Tea chrysanthemum detection under unstructured environments using the TC-YOLO model[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 193(1): 116473.
- [8] HU Gensheng, WU Haoyu, ZHANG Yan, et al. A low shot learning method for tea leaf's disease identification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163(4): 104852.
- [9] 汪琳. 基于 SCARA 机械手的采茶机器人研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
WANG Lin. Research on tea-picking robot based on SCARA manipulator[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [10] 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 test of multi-purpose intelligent tea harvester based on machine vision[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 15-20.
- [11] 杨化林, 钟岩, 姜沅政, 等. 基于时间与急动度最优的并联式采茶机器人轨迹规划混合策略[J]. 机械工程学报, 2022, 58(9): 62-70.
YANG Hualin, ZHONG Yan, JIANG Yuanzheng, et al. Hybrid strategy for trajectory planning of parallel tea-picking robot based on optimal time and urgency[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(9): 62-70.
- [12] BOUDJEDIR C E, BOUKHETALA D, BOURI M. Nonlinear PD plus sliding mode control with application to a parallel delta robot[J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 69(5): 329-336.
- [13] LUIS C, ALBERTO L, ISAAC C. Robust trajectory tracking of a delta robot through adaptive active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on

- Control Systems Technology, 2015, 23(4): 1387-1398.
- [14] NGUYEN T, HARTON D, CAMPEAU-LECOURS A, et al. Motion control algorithms based on the dynamic modelling of kinematically redundant hybrid parallel robots[J]. *Mechatronics*, 2021, 76(5): 102555.
- [15] YANG Hualin, CHEN Long, MA Zhibin, et al. Computer vision-based high-quality tea automatic plucking robot using Delta parallel manipulator[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 181(7): 105946.
- [16] ZHU Yingpeng, WU Chuanyu, TONG Junhua, et al. Deviation tolerance performance evaluation and experiment of picking end effector for famous tea[J]. *Agriculture*, 2021, 11(2): 1-18.
- [17] XU Wenkai, ZHAO Longgang, LI Juan, et al. Detection and classification of tea buds based on deep learning[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 192(33): 106547.
- [18] LI Yatao, HE Leiyang, JIA Jiangmin, et al. In-field tea shoot detection and 3D localization using an RGB-D camera[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 185(1): 106149.
- [19] 杨启志, 孙梦涛, 蔡静, 等. 温室穴盘苗并联高速移栽机器人运动误差分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(3): 18-27.
- YANG Qizhi, SUN Mengtao, CAI Jing, et al. Analysis and test of motion error of greenhouse plug seedling parallel high-speed transplanting robot[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 18-27.
- [20] 刘胜, 郭晓杰, 张兰勇. 六相永磁同步电机新型指数趋近律滑模控制[J]. *控制工程*, 2018, 25(10): 1791-1797.
- LIU Sheng, GUO Xiaojie, ZHANG Lanyong. New exponential reaching law sliding mode control of six-phase permanent magnet synchronous motor[J]. *Control Engineering*, 2018, 25(10): 1791-1797.
- [21] DURAKLI Z, NABIYEV V. A new approach based on Bézier curves to solve path planning problems for mobile robots[J]. *Journal of Computational Science*, 2021, 58(2): 101540.
- [22] LIANG X, QU X R, WAN L, et al. Three-dimensional path following of an underactuated AUV based on fuzzy back-stepping sliding mode control[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2018, 20(2): 640-649.
- [23] HARADA K, TSUJI T, NAGATA K, et al. Validating an object placement planner for robotic pick-and-place tasks[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62(10): 1463-1477.
- [24] MAHMOOD M, MOSTAFA T, PEGAH G G. Fault tolerant control based on adaptive super-twisting nonsingular integral-type terminal sliding mode for a delta parallel robot[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(8): 443.
-
- 作者简介: 周宇杰, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为农业机器人。
E-mail: zyj_408@163.com
武传宇(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 教授。主要从事农业机器人与智能农业装备研究。
E-mail: cywu@zstu.edu.cn