果 树 学 报 2026,43(10):2905-2918
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250591

攀爬式椰子采摘机器人设计与试验

殷新洁[1],张 徐[1],郑鸿成[1],付昱兴[2],付 威[1*],谷 阳[1*]

([1]海南大学机电工程学院,海口 570228;[2]海南大学信息与通信工程学院,海口 570228)

摘 要:【目的】探究攀爬式椰子采摘机器人的爬升装置设计与采摘机构设计方案,为椰树高空采摘作业提供安全高效的解决方案。**【方法】**开展爬升机构在树干上的受力分析,建立机器人匀速爬升力学模型;设计四自由度机械臂,调整末端链锯空间位姿,实现多角度椰子果柄锯切。采用射频域通信方法搭建机器人远程图传控制系统,实现机器人远程实时控制。**【结果】**通过机械臂切割性能试验,当关节转速为0.5 r·min^{-1}时,由链锯切割引起的振荡幅度保持在2 N·m以内,系统整体稳定性良好。田间测试结果表明,椰子采摘机器人攀爬高9.7 m椰子树,完成椰子单簇采摘,并返回地面的平均作业时间为431.98 s,平均攀爬时间与平均单簇椰子采摘时间分别为107.31 s和259.6 s。**【结论】**椰子采摘机器人为自动化和智能化摘椰提供了技术支持。

关键词:椰子;采摘机器人;爬升装置;机械臂;远程控制

中图分类号:S667.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)10-2905-14

Design and experiment of coconut picking robot with climbing

Yin Xinjie[1], Zhang Xu[1], Zheng Hongcheng[1], Fu Yuxing[2], Fu Wei[1*], Gu Yang[1*]

([1]Mechanical and Electrical Engineering College, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China; [2]School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China)

Abstract:【Objective】Hainan Province, China's largest tropical island province, has become a major national coconut-producing region thanks to its unique advantages in light and thermal resources. However, coconut picking operations still rely predominantly on traditional manual methods, facing numerous technical bottleneckssuch as high labor intensity and considerable risks associated with working at height, which result in high production costs and low picking efficiency. There is a clear gap between the current level of technological equipment for coconut picking and the requirements of industrial development. Therefore, research into coconut picking robots is beneficial for addressing these issues and reducing the reliance on manual picking. The primary technical challenges for coconut picking robots lie in the design of climbing devices and picking manipulators. In particular, the distinctive planting patterns and structural features of coconut trees in Hainan Province impose more stringent requirements on the adaptability and stability of climbing devices, as well as the precision and flexibility of the picking manipulator. Currently, significant technical deficiencies remain in the climbing performance of coconut picking robots under complex terrain conditions, and in the manipulator's control accuracy in high-altitude working environments. To promote the mechanization of the coconut picking industry in Hainan Province, a climbing-type coconut picking robot has been designed in this study, with the aim of enhancing the mechanization level of coconut picking in Hainan Province.【Methods】The coconut picking robot mainly consisted of a climbing device, a picking manipulator, and an embedded remote control system. The climbing device adopted an annular main body structure to enhance overall stability, and to climb tree trunks of varying diameters through an adaptive mechanism. The picking manipulator

收稿日期:2025-10-27 **接受日期:**2026-02-16

基金项目:海南省重点研发项目(ZDYF2025XDNY126);海南省研究生创新科研课题(Qhys2024-220)

作者简介:殷新洁,男,在读硕士研究生,研究方向为椰子智能化采收装备设计与开发。E-mail:yxj@hainanu.edu.cn

*通信作者 Author for correspondence. E-mail:994026@hainanu.edu.cn;E-mail:guyangl@hainanu.edu.cn

was designed with a four-degree-of-freedom structure, allowing flexible adjustment of the chainsaw posture to accommodate coconut fruit stalks growing in different directions, thereby improving operational flexibility. By analyzing the forces on the climbing mechanism along the trunk, this study established a mechanical model for the robot's uniform climbing and analyzed the mechanical conditions for stability maintenance. Guided by the theoretical framework of this model, the mechanism design was optimized, enabling stable climbing functionality of the robot. A remote image transmission control system for the picking robot was constructed using radio frequency communication methods, and a bidirectional communication link was established between the remote controller, climbing device, and picking manipulator, thereby enabling real-time monitoring and precise control of the robot's motion status and operational processes.【Results】A cutting test platform for coconut cluster fruit stalks was constructed based on the coconut picking robot and a gripping test bench, and the cutting performance of the robot was tested. During the experiment, the variation in torque of the picking manipulator during the cutting process and the current fluctuation of the chainsaw at the end-effector were monitored. The results demonstrated that greater rotational speed during cutting resulted in higher peak torque, and the manipulator was able to rapidly return to a stable state after completing the sawing process. Throughout the sawing tests, the manipulator exhibited a smooth sawing process and effectively completed the cutting of coconut cluster fruit stalks. Additionally, full-cycle performance tests—encompassing climbing, harvesting, and descending—were conducted using 11 randomly selected coconut trees as test samples. The results showed that the coconut picking robot required an average operation time of 431.98 s to climb a 9.7 m coconut tree, complete the picking of a single cluster, and return to the ground, and the average climbing time was 107.31 s and an average single-cluster picking time was 259.6 s. Moreover, for coconut trees of similar height, the climbing time was mainly influenced by the trunk circumference and inclination.【Conclusion】The coconut picking robot designed in this study alleviates the labor intensity and risks associated with manual picking operations, reduces labor costs, enhances mechanization and intelligence, and promotes the development of the coconut industry. Field trials of the coconut picking robot have validated its performance in meeting picking requirements, thus providing technical support for the mechanization of coconut harvesting in Hainan Province.

Key words: Coconut; Picking robot; Climbing device; Robotic arm; Remote control

椰子为棕榈科椰子属植物，是一种重要的木本油料作物和食品能源作物，具有丰富的营养和经济价值，在热带地区被誉为“宝树”[1-3]。海南省作为我国最大的热带岛屿，因其优越的光热条件，成为我国椰子生产的主产区[4]。海南省多为高种椰子，其主干粗壮、高大，冠层结构复杂。椰子采摘方式主要为人工爬树摘椰，摘椰过程劳动强度大，高空作业风险高[5-6]。因此，亟须研制椰子采摘机械代替人工进行果实采摘。

近年来，随着机器人技术的不断发展，以苹果[7]、柑橘[8]、草莓[9]、猕猴桃[10]等大宗水果为对象，一系列水果采摘机器人研究取得了重要进展[11]。Silwal等[12]研究了一种低传感的苹果采摘机器人系统，采摘成功率为84%。冯青春等[13]研制了一台四臂苹果采摘机器人，该机器人对树冠内全部果实的采摘成功率为82%。王佳虹等[14]设计了一种猕猴桃采摘机器人系统，平均采摘成功率为85%，平均单果采摘时间约3.01 s。然而，椰子树主干高大，椰子生长在树干顶部冠层中，现有的地面水果采摘机器人不适用于采摘椰子。椰子采摘机器人需具备爬升和采摘功能，需确保机械臂能够抵达冠层采摘区域，开展摘椰作业[15]。

针对椰子机械化采摘，杨永等[16]设计了一种椰子采摘机械臂，通过夹持式末端执行器实现对椰子的抓取与旋转采摘。苏明等[17]提出了一种椰子摘果机设计方案，通过地面行走底盘、机械臂和旋转切割

机构实现机械化采摘。周中华等[18]提出了一种新型椰子采摘装置，由剪切机构和爬升机构组成，实现了椰子的爬升和采摘功能。王禹涵等[19]设计了一种椰子采摘机器人，主要由传送履带系统、伸缩系统和采摘系统组成。上述椰子采摘机主要集中在机械结构设计和工作空间仿真分析，仅针对单一区域椰子的采摘，对树干直径适应性有限。在国外研究方面，Kumar 等[20]设计了一种五自由度椰子采摘机械臂，末端执行器采用圆形刀盘。Dubey 等[21]研究了一种自主椰子爬树收获机器人，采用双模块化结构可适应椰子树表面的不规则性。Subramanian 等[22]设计了一种椰子爬树采摘机器人，采用轮式驱动、弹簧防坠系统和伸缩框架结构适应树干直径变化。Maheswaran 等[23]研制了一种椰子采摘机器人，采用 8 个主动轮构成的环形夹持单元通过弹簧适应不同直径的树干。尽管这些研究实现了椰子采摘功能，但难以适应不同径向尺寸的椰子树，并且受限于爬升装置的竖直爬升工作方式，爬升装置在椰子树干上不能调整相对于椰冠层的方位，每次爬升仅实现局部椰子的采摘，难以实现对冠层全方位、多角度的果实采摘。

为了实现稳定的爬树功能以及多角度的灵活采摘作业，本研究设计了爬树与采摘功能一体化的椰子采摘机器人。首先，根据椰子生长特征信息设计了椰子采摘机器人的整体结构与主要参数。其次，对机器人的爬升装置和采摘机械臂进行力学分析和建模仿真。设计的爬升装置采用自适应夹持机构，能够适应不同直径树干的攀爬作业，通过驱动轮环绕树体旋转改变采摘位置，增大椰子采摘的作业范围。基于 STM32 搭建了远程嵌入式控制系统，通过四自由度机械臂多关节协同运动，控制末端链锯到达椰子采摘果柄。最后，通过性能测试试验，验证机器人设计满足实际采摘需求。

1　椰子采摘机器人结构组成及工作原理

1.1　椰子采摘机器人结构组成

椰子树茎干直立，呈圆柱状，具有环状叶痕，高度为 5~20 m，直径可达 20~40 cm。叶片为羽状复叶，呈辐射状丛生于树干顶端，长度可达 4~6 m。在冠层中，椰果呈现簇状聚集，且环状分布生长（图 1）。

根据椰子的生长特征信息，本研究提出了攀爬式椰子采摘机器人的设计方案，主要由爬升装置、采摘机械臂和嵌入式远程控制系统组成（图 2），主要技术参数如表 1 所示。

1.2　椰子采摘机器人工作原理

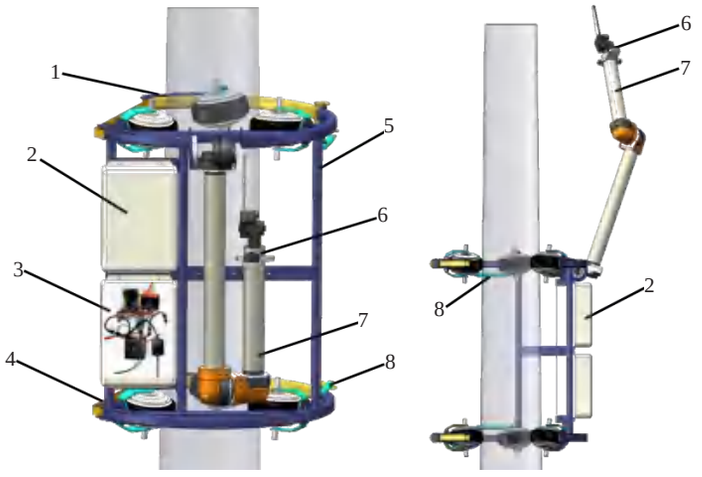
首先，将椰子采摘机器人放置在树干上，通过弹性带和气弹簧拉紧机器人。然后采用远程遥控方式控制爬升装置的驱动轮带动机器人向上螺旋爬升。机器人在爬升过程中为适应树干直径变化，通过弹

A. 椰树；B. 椰树冠层。

A. Coconut tree; B. Coconut canopy.

图 1　椰子生长信息

Fig. 1　Coconut growth information



1. 夹紧装置；2. 控制柜；3. 嵌入式远程控制系统；4. 弹性带；5. 爬升装置；6. 图传相机；7. 采摘机械臂；8. 气弹簧。

1. Clamping device; 2. Control cabinet; 3. Embedded remote control system; 4. Elastic band; 5. Climbing device; 6. Image transmission camera; 7. Picking robotic arm; 8. Gas spring.

图 2 椰子采摘机器人

Fig. 2 Coconut picking robot

表 1 椰子采摘机器人主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of coconut picking robot

主要技术参数 The main technical parameters	参数值 Parameter value
整机尺寸（长×宽×高）Dimensions (length×width×height)/mm	660×660×800
质量 Mass/kg	47
爬升速度 Climbing speed/（$m \cdot s^{-1}$）	0.1~1.0
电池容量 Cell capacity/Ah	60
适用树干直径区间范围 Applicable trunk diameter range/cm	20~35
连续作业时间 Continuous operating time/h	2.5

性带和气弹簧自适应调整预紧力，保持椰子采摘机器人爬升的稳定性。当爬升装置到达椰果采摘位置后，作业人员利用遥控器控制爬升装置的驱动轮电机，使其处于主动锁死状态，保持机器人静止。使用遥控器控制机械臂展开，利用图传系统反馈的视频流调整机械臂的位置，移动链锯到椰子果柄部位开展锯切作业。考虑到椰果的环状空间分布特性，完成一侧采摘作业后，调整爬升装置环绕树干旋转至树干另一侧进行采摘。完成采摘作业后，控制爬升装置驱动轮电机反转，使采摘机器人下降。当机器人下降至树干底部时，作业人员松开弹性带取下采摘机器人并重复上述过程，完成下一棵树的采摘作业。

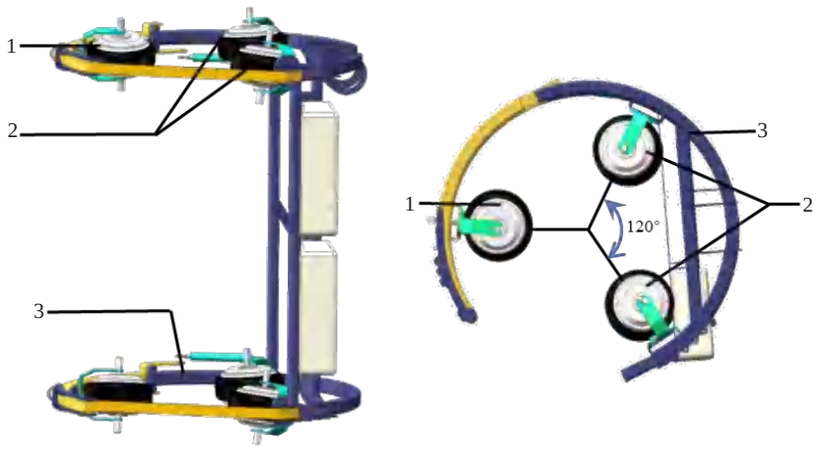
2 关键部件的设计

2.1 爬升装置设计

爬升装置主要由驱动轮、从动轮和环形机架组成（图3）。采用环形机架作为爬升装置主体结构，保持轮子紧贴椰子树干，提供良好的稳定性。通过调节轮子相对水平角度可改变在相同速率下爬升的高度。每个驱动轮均采用具有记忆功能的伺服电机作为驱动电机，能够实现自锁，防止意外坠落。

为实现机器人稳定爬升，在机器人夹持树体状态下进行力学分析，建立爬升装置稳定夹持的静力学平衡模型，分析爬升装置自身重力、摩擦力对驱动力的影响。为简化分析模型，假设椰子树干为理想刚性圆柱体，并且机器人在匀速爬升工况下作业，忽略运动加速度；同时，驱动轮与树干接触界面满足纯滚动、无滑动条件。假设爬升装置上下完全对称，在受力分析时，以爬升装置上半部分作为受力分析对象进行静力学分析。

力的简化模型如图4所示，驱动轮受电机驱动，



1. 从动轮；2. 驱动轮；3. 环形机架。

1. Driven wheel; 2. Driving wheel; 3. Ring frame.

图 3　爬升装置结构图

Fig. 3　The structure diagram of the climbing device

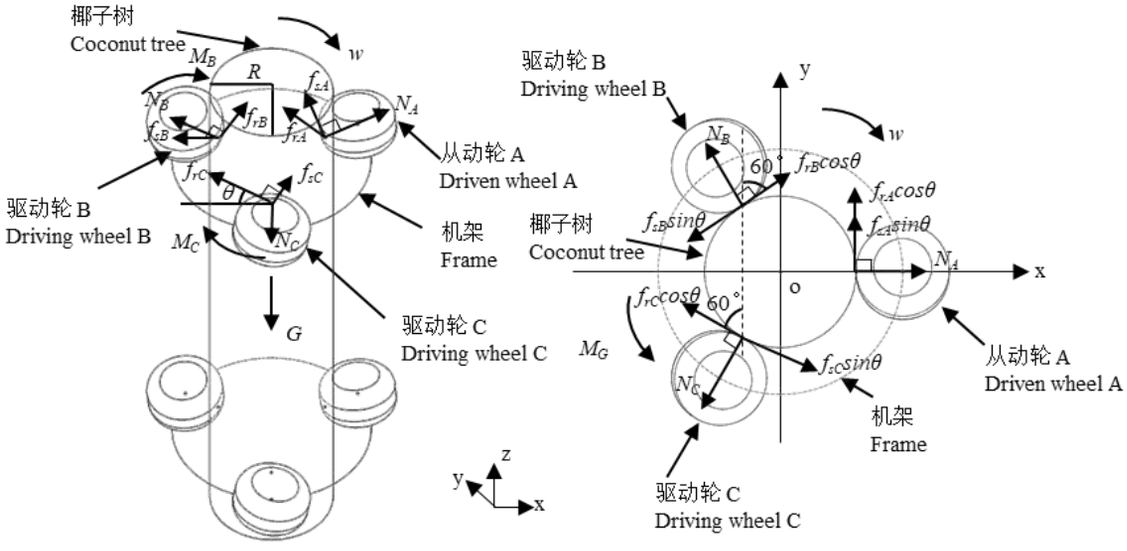


图 4　爬升装置受力分析

Fig. 4　Force analysis of climbing device

在接触位置相对于树干具有向后的运动趋势，而从动轮受惯性作用，在接触位置相对树干表现出向前的运动趋势，侧向摩擦力方向垂直于滚动方向，方向向上。各方向合力及 xy 平面内合力矩为：

$$\begin{cases} \Sigma F_x = N_A - N_B\cos 60° - N_C\cos 60° + f_{rB}\cos\theta\sin 60° - f_{rC}\cos\theta\sin 60° \\ \qquad -f_{sB}\sin\theta\sin 60° + f_{sC}\sin\theta\sin 60° \\ \Sigma F_y = N_B\sin 60° - N_C\sin 60° + f_{rA}\cos\theta + f_{rB}\cos\theta\cos 60° + f_{rC}\cos\theta\cos 60° \\ \qquad +f_{sA}\sin\theta - f_{sB}\sin\theta\cos 60° - f_{sC}\sin\theta\cos 60° \\ \Sigma F_z = -f_{rA}\sin\theta + f_{rB}\sin\theta + f_{rC}\sin\theta + f_{sA}\cos\theta + f_{sB}\cos\theta + f_{sC}\cos\theta - G \\ \Sigma M_{Oxy} = f_{rA}\cos\theta R - f_{rB}\cos\theta R - f_{rC}\cos\theta R + f_{sA}\sin\theta r + f_{sB}\sin\theta R \\ \qquad +f_{sC}\sin\theta R + M_G \end{cases}。\tag{1}$$

式中，N_A：从动轮 A 的弹性力，N；N_B：驱动轮 B 的弹性力，N；N_C：驱动轮 C 的弹性力，N；f_{rA}：从动轮 A 滚动方向的摩擦力，N；f_{rB}：驱动轮 B 滚动方向的摩擦力，N；f_{rC}：驱动轮 C 滚动方向的摩擦力，N；

f_{sA}：从动轮A的侧向摩擦力，N；f_{sB}：驱动轮B的侧向摩擦力，N；f_{sC}：驱动轮C的侧向摩擦力，N；θ：轮子倾斜角度，(°)；R：树干半径，m；G：机器人自身一半重力，N；M_G：重力引起的自发旋转转矩，N·m。

由于两个主动轮对称布置，故假设：

$$\begin{Bmatrix} N_B = N_C \\ f_{rB} = f_{rC} \\ f_{sB} = f_{sC} \end{Bmatrix}。 \quad (2)$$

由静力平衡与力矩平衡原理，得出爬升装置力平衡方程为：

$$\begin{Bmatrix} \Sigma F_x = 0 \\ \Sigma F_y = 0 \\ \Sigma M_{Oxy} = 0 \\ \Sigma F_Z = 0 \\ f_{rA}^2 + f_{sA}^2 = \mu N_A \\ f_{rB}^2 + f_{sB}^2 = \mu N_B \end{Bmatrix}。 \quad (3)$$

式中，μ是从动轮和驱动轮与椰子树表面之间的摩擦系数。为增大爬升装置与树干表面的附着力，从动轮和驱动轮使用橡胶材质。查阅相关文献[24]，橡胶轮与椰子树体表面的摩擦系数=0.87。取椰子树干半径为0.2 m，轮子偏转角为10°，爬升装置上下对称，自身一半重力为200 N，由$M_G = GR\tan\theta$，解式(3)得：

$$\begin{Bmatrix} N_A = 230.28\ \text{N} \\ N_B = 230.28\ \text{N} \\ f_{rA} = 23.15\ \text{N} \\ f_{rB} = 46.31\ \text{N} \\ f_{sA} = -199.00\ \text{N} \\ f_{sB} = 194.92\ \text{N} \end{Bmatrix}。 \quad (4)$$

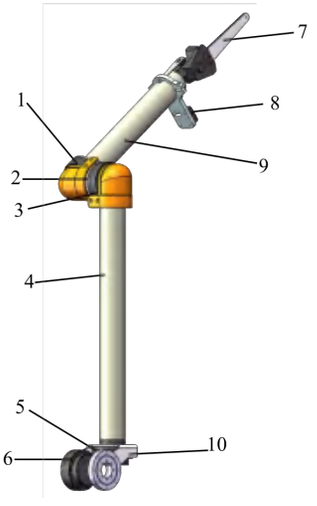
其中，f_{sA}为负值，表示方向与假设方向相反，即垂直于滚动方向向下。已知轮子半径r为0.08 m，则计算电机提供的转矩T为：

$$T = f_{rB} r = 3.70\ \text{N·m}。 \quad (5)$$

根据上述计算结果，选用驱动轮直流电机的型号为HB-156，其额定转速：290 r·min^{-1}；额定扭矩22 N·m，能够满足爬升装置驱动需求。

2.2 采摘机械臂设计

为提高采摘椰子的灵活性和减轻爬升装置的载荷，本研究使用铝复合材料设计了一种4自由度结构的采摘机械臂(图5)。关节1作为机械臂的折叠关节，在爬升装置旋转爬升过程中，机械臂可以折叠。关节2设计为绕腰部旋转，关节3和关节4协同控制末端执行器。整体结构由伺服电机驱动并配备切割链锯及图传相机，采摘机械臂主要技术参数如表2所示。



1. 关节4；2. 连杆3；3. 关节3；4. 连杆2；5. 关节2；6. 关节1；7. 链锯；8. 相机；9. 连杆4；10. 连杆1。

1. Joint 4; 2. Link 3; 3. Joint 3; 4. Link 2; 5. Joint 2; 6. Joint 1; 7. Chainsaw; 8. Camera; 9. Link 4; 10. Link 1.

图5 采摘机械臂结构图

Fig. 5 The structure diagram of picking robotic arm

表2 采摘机械臂主要技术参数

Table 2 Main parameters of picking robotic arm

主要技术参数 The main technical parameters	参数值 Parameter value
自由度 Degree of freedom	4
连杆1长度 Length of connecting rod 1/mm	100
连杆2长度 Length of connecting rod 2/mm	690
连杆3长度 Length of connecting rod 3/mm	100
连杆4长度 Length of connecting rod 4/mm	670
关节1角度变化范围 Angle variation range of joint 1/(°)	−180~0
关节2角度变化范围 Angle variation range of joint 2/(°)	−180~180
关节3角度变化范围 Angle variation range of joint 3/(°)	−180~180
关节4角度变化范围 Angle variation range of joint 4/(°)	−180~180
质量 Mass/kg	7

2.3 采摘机械臂正运动学建模

基于李群李代数及旋量理论建立椰子采摘机械臂正向运动学模型，当机械臂关节角度全为0时，椰子采摘机械臂处于初始姿势(图6)。

由图6可得机械臂的初始位姿为：

$$g_{st}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 + l_4 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & -l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \quad (6)$$

式中，$l_1 \sim l_4$为机械臂各个连杆的长度。

刚体的运动旋量坐标ξ是由线速度v和角速度

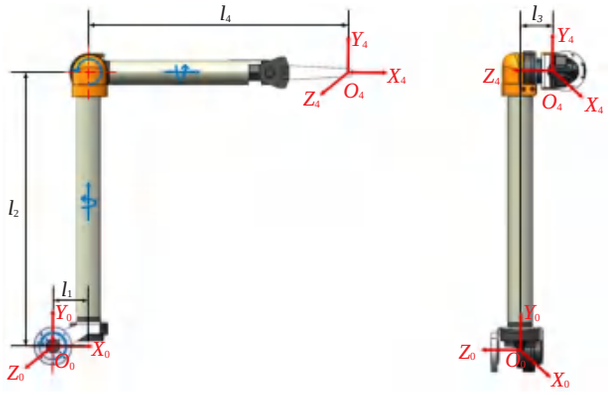


图 6　采摘机械臂初始位置

Fig. 6　The initial position of the robotic arm

ω 组成的，本研究设计的椰子采摘机器人关节均为转动关节，则

$$\xi_i=\begin{bmatrix} r_i\times\omega_i \\ \omega_i \end{bmatrix}。\tag{7}$$

式中：ω_i 为运动旋量轴线上的单位矢量；r_i 为轴线上的任意一点。

刚体的旋量运动矩阵形式为：

$$e^{\xi_1\theta_1}=\begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$e^{\xi_2\theta_2}=\begin{bmatrix} c_2 & 0 & s_2 & -l_1(c_2-1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_2 & 0 & c_2 & l_1s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$e^{\xi_3\theta_3}=\begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_2s_3-l_1(c_3-1) \\ s_3 & c_3 & 0 & -l_1s_3-l_2(c_3-1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};\tag{8}$$

$$e^{\xi_4\theta_4}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_4 & -s_4 & -l_3s_4-l_2(c_4-1) \\ 0 & s_4 & c_4 & -l_2s_4+l_3(c_4-1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

式中，$s_i=\sin\theta_i$，$c_i=\cos\theta_i$，θ_i（i=1，2，3，4）为各连杆旋转角度。

结合机械臂初始位置和式（8）得到椰子采摘机械臂的正运动学方程的指数积形式，如式（9）所示：

$$g_{st}(\theta)=e^{\xi_1\theta_1}e^{\xi_2\theta_2}e^{\xi_3\theta_3}e^{\xi_4\theta_4}g_{st}(0)=\begin{bmatrix} R_\theta & P_\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}。\tag{9}$$

式中，R_θ 为机械臂的末端姿态矩阵；P_θ 为机械臂的末端位置矩阵。

将椰子采摘机器人机械臂的末端姿态矩阵和末端位置矩阵展开如式（10）所示。

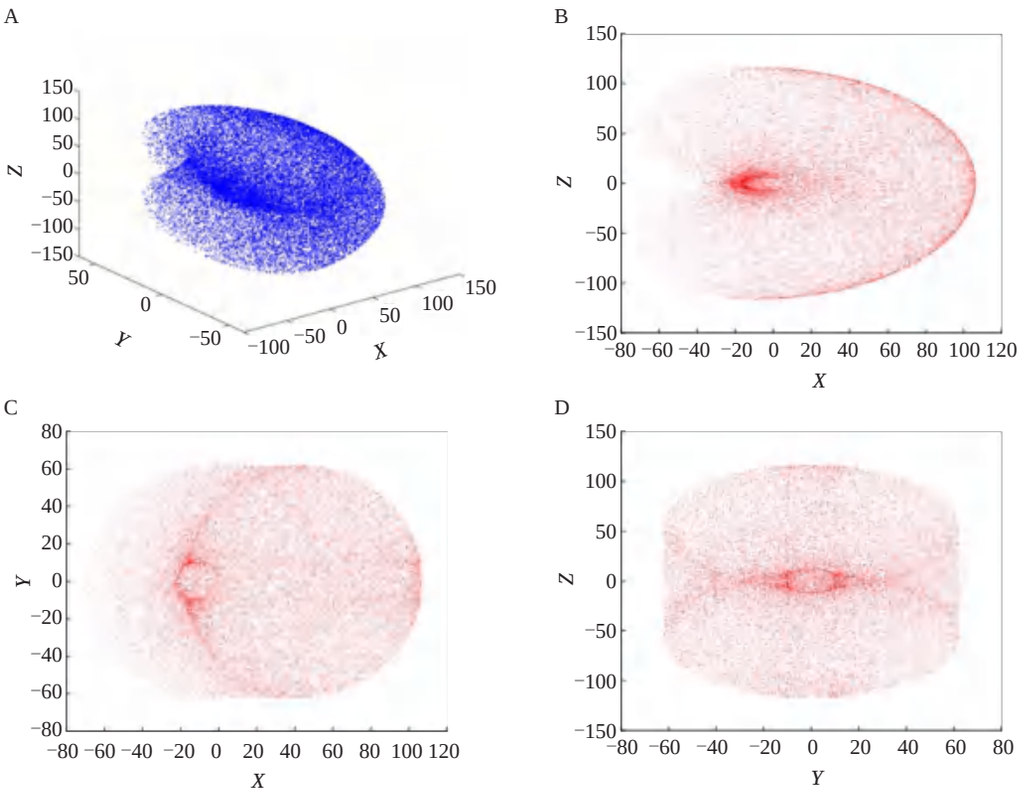
$$R(\theta)=\begin{bmatrix} c_1c_2c_3-s_1s_3 & c_1s_2s_4-c_4(c_3s_1+c_1c_2s_3) & c_1c_4s_2+s_4(c_3s_1+c_1c_2s_3) \\ c_1s_3+c_2c_3s_1 & s_1s_2s_4+c_4(c_1c_3-c_2s_1s_3) & c_4s_1s_2-s_4(c_1c_3-c_2s_1s_3) \\ -c_3s_2 & c_2s_4+c_4s_2s_3 & c_2c_4-s_2s_3s_4 \end{bmatrix};$$

$$p(\theta)=\begin{bmatrix} l_1c_1-l_2s_1-l_3c_1s_2-l_4s_1s_3+l_4c_1c_2c_3 \\ l_1s_1+l_2c_1-l_3s_1s_2+l_4c_1s_3+l_4c_2c_3s_1 \\ -l_3c_2-l_4c_3s_2 \end{bmatrix}。\tag{10}$$

为验证机械臂工作空间是否满足实际工作需求，采用蒙特卡罗法通过足够多的采样点进行机械臂运动空间仿真。由于机械臂在采摘过程中需要对每个关节旋转角度进行限制，以确保机械臂在正常范围内工作。使用 MATLAB 机器人工具箱的 rand 函数在各关节角度范围内 $\theta_{i,\ min}$，$\theta_{i,\ max}$ 随机生成大量样本：

$$\theta_i=\theta_{i,\ min}+(\theta_{i,\ max}-\theta_{i,\ min})\cdot\text{rand}。\tag{11}$$

对每个关节角度组合，通过正运动学计算末端坐标，循环迭代 30 000 次，最终获得机械臂的工作空间（图 7）。结果表明，采摘机械臂在 X、Y、Z 三轴的运动范围分别为−62~62 cm、−72~107 cm 和−117~117 cm。由于爬升装置可绕树干进行环绕爬升，当爬升装置抵达椰树冠层作业区域时，通过电机锁死将采摘机器人固定在目标位置，此时椰果位于采摘机器人正上方 0.6~1 m 的空间范围。当椰子采摘机器人摘完上方椰果后，机械臂转动关节能够采摘−0.6~0.6 m 的工作空间内椰果。在对上方的椰果进行采摘后，可转动爬升装置进行旋转，改变爬升装置相对椰树冠层的方位，从而采摘其余方位椰果。当机械臂在某一固定角度受到树枝遮挡时，可通过控制爬升装置微调机身旋转角度寻找无遮挡路径。而对于高度遮挡的椰子簇，可能找不到有效的切割点，从而导致采摘失败。通过整体协作可以保证机



A. 空间视图；B. *Y* 方向视图；C. *Z*方向视图；D. *X* 方向视图。

A. Space view; B. *Y* direction view; C. *Z* direction view; D. *X* direction view.

图 7 机械臂空间视图

Fig. 7 Space view of robotic arm

械臂末端执行器能够抵达并切割冠层下方的多数椰果。

3 控制系统设计

椰子采摘机器人控制系统的核心任务是协调各执行机构实现精准动作控制与功能集成。本研究以嵌入式运动控制器作为主控制器，设计了基于CAN总线通信协议的嵌入式远程控制系统，实现椰子采摘机器人的实时控制功能。

椰子采摘机器人控制系统工作原理如图8所示。打开电源开关，通过降压模块给遥控器接收机和主控制器供电，遥控器与遥控器接收机对频建立射频域链路。通过操杆来控制爬升装置电机输出转速信号，实现爬升装置的爬升、下降和调速。使用图传系统反馈的视频流调整机械臂位姿，控制末端链锯转动切割果柄，实现摘椰。

3.1 控制系统硬件组成

控制系统的硬件主要分为上位机和下位机。STM32单片机作为椰子采摘机器人下位机的主控制单元，采用168MHz ARM Cortex-M4处理器。爬升装置的驱动轮电机使用具有掉电记忆功能的HB-156直流电机，通过编码器反馈的电机参数搭配控制器实现速度和位置的闭环控制。采摘机械臂位姿调整模块使用内置绝对值编码器的伺服电机，与STM32通过CAN（controller area network）收发模块建立通信。链锯电机使用MD80-1直流电机，采用D50A MOS（metal oxide semiconductor）双路直流电机驱动器，通过STM32控制单元输出的PWM信号实现末端执行器速度调节功能。椰子采摘机器人使用24 V作为电源电压，而电机编码器和STM32控制单元均使用5 V电源作为输入。使用24 V转5 V降压模块提供稳定的电压输入，主要电气控制元件如表3所示。

3.2 通信系统设计

通信模块主要负责响应遥控器发出的指令信号及通过遥控器获取图传相机输出的视频流，通信系统数据流程图如图9所示。安装在机械臂末端的摄像头采集椰子簇位置信息进行图像预处理通过

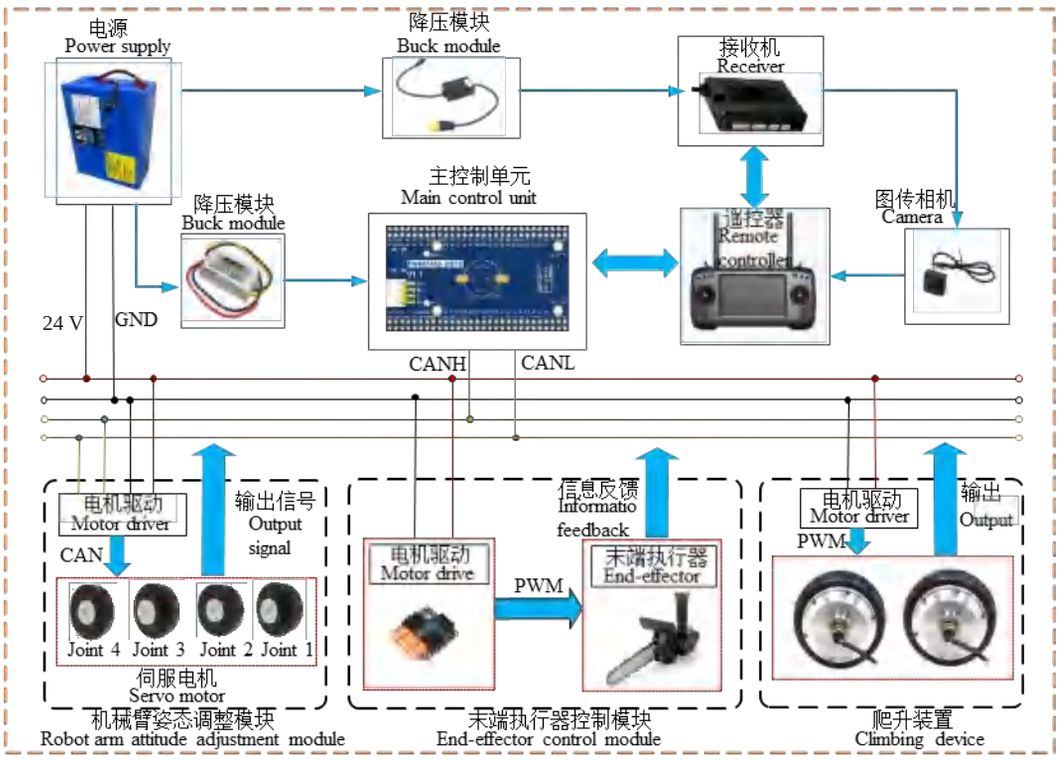


图 8　控制系统示意图

Fig. 8　Control system diagram

表 3　主要电气控制元件

Table 3　Main electrical control elements

元件 Component	主要参数 Main parameters
STM32F407ZGT6	最大工作频率 168 MHz Maximum operating frequency 168 MHz
HB-156 直流电机 HB-156DC motor	额定转速 290 r·min^{-1} Rated speed 290 r·min^{-1} 额定扭矩 22 N·m Rated torque 22 N·m
MD80-1 直流电机 MD80-1 DC motor	额定转速 4000 r·min^{-1} Rated speed 4000 r·min^{-1} 额定扭矩 3 N·m Rated torque 3 N·m
PDA-54 伺服电机 PDA-54 servo motor	额定转速 43 r·min^{-1} Rated speed 43 r·min^{-1} 额定扭矩 54 N·m Rated torque 54 N·m
PDA-24 伺服电机 PDA-24servo motor	额定转速 41 r·min^{-1} Rated speed 41 r·min^{-1} 额定扭矩 24 N·m Rated torque 24 N·m
PDA-09 伺服电机 PDA-09servo motor	额定转速 168 r·min^{-1} Rated speed 168 r·min^{-1} 额定扭矩 9 N·m Rated torque 9 N·m
遥控器接收机 Remote control receiver	SBUS 通道 16 SBUS channel 16
4S~18S 降压模块 4S~18S buck module	输入电压 14.8~66.6 V Input voltage 14.8~66.6 V 输出电压 12 V Output voltage 12 V
DC-DC 降压电源转换器 DC-DC Buck power converter	输入电压 8~60 V Input voltage 8~60 V 输出电压 5 V Output voltage 5 V
D50A MOS 双路电机驱动 D50A MOS dual motor driver	额定电流 12.8 A Rated current 12.8 A 输出电压 5.6~33.8 V Output voltage 5.6~33.8 V

LAN（local area network）总线传输给遥控器接收机，经过遥控器接收机视频处理后与遥控器通过射频域建立通信链路。遥控器操纵杆输出通道值，遥控器接收机通过无线通信接收并解析遥控器的数据信号。最后，主控制单元通过 SBUS 取反电路解析遥控器接收机输出的 SBUS 信号，获取遥控器的通道值输出。

通信系统主要为 SBUS 信号解码与控制信号映

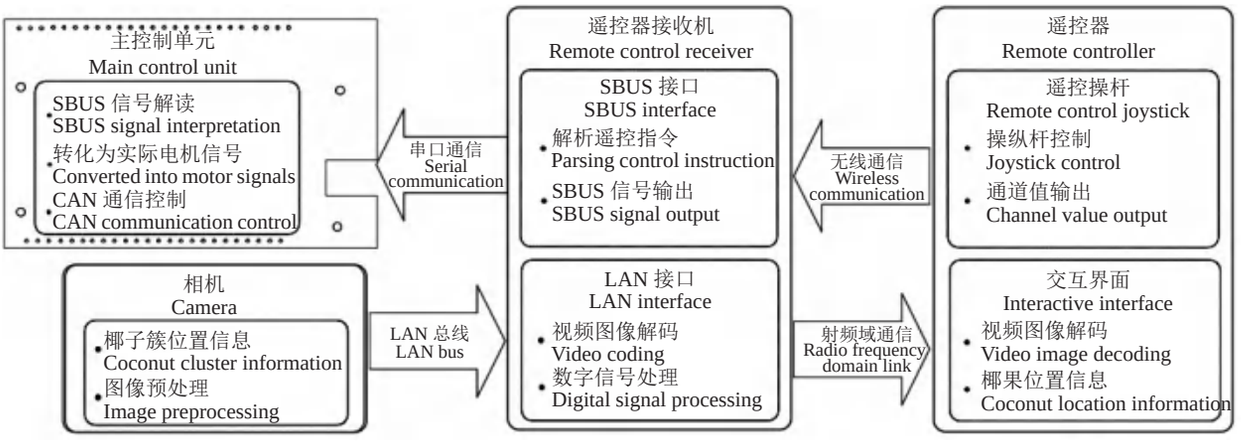


图 9 通信系统数据流程图

Fig. 9 Communication system data flow chart

射模块和系统总时延模块的设计。SBUS信号是16通道串行数字信号，需通过单片机解码为原始通道数据，映射为执行器的控制量。SBUS信号串行数据解码后需消除帧同步字、校验位的影响，还原单通道数据：

$$S_k=\left(\sum_{i=0}^{10} d_{k,\ i}\times 2^i\right)-S_{offset}。\tag{12}$$

式中，S_k：第k个SBUS通道解码后的原始数据，μs；$d_{k,\ i}$：第k通道的第i位串行数据；S_{offset}：SBUS数据偏移量；i：SBUS单通道数据位索引。

将解码后的SBUS原始数据进行通道标准化：

$$\tilde{s}_k=\frac{2\left(s_k-s_{k,\ min}\right)}{s_{k,\ max}-s_{k,\ min}}-1。\tag{13}$$

式中，$s_{k,\ min}$，$s_{k,\ max}$分别为通道k的最小原始数值和最大原始数值。

映射到PWM：

$$u_k=sat\left(K_i\tilde{s}_k+b_i,\ u_{i,\ min},\ u_{i,\ max}\right)。\tag{14}$$

式中，K_i：缩放系数，b_i：偏置，sat：饱和函数，$u_{i,\ min}$，$u_{i,\ max}$分别为输出的最小值和最大值。

为避免摇杆轻微抖动或SBUS噪声导致电机不断抖动，考虑到死区与抗抖动，加入死区处理后的控制量为：

$$u_k^{db}=\begin{cases}0, & |\tilde{s}_k|<\delta_i\\ u_k, & \text{其他}\end{cases}。\tag{15}$$

式中，δ_i：死区阈值。

通信控制系统的实时性直接影响控制精度，总时延为各模块时延之和：

$$T_{\text{total}}=\tau_{\text{SBUS}}+\tau_{\text{dec}}+\tau_{\ \text{ctrl}}+\tau_{\text{rf}}。\tag{16}$$

式中，T_{total}：系统总时延，ms；τ_{SBUS}：SBUS信号接收时延，ms；τ_{dec}：单片机解码时延，ms；τ_{ctrl}：控制信号输出时延，ms；τ_{rf}：射频通信时延，ms。

4 椰子采摘机器人性能测试

4.1 采摘机械臂切割性能测试

为验证椰子采摘机器人能否成功切断椰子簇果柄，进行了机械臂切割性能测试。以嫩椰子簇果柄为试验对象，使用椰子采摘机器人和夹持试验台搭建椰子果柄切割试验平台，如图10所示。

机械臂的关节1、关节2与关节4主要为了调整机械臂的方位，在锯切过程中由关节3和末端电机执行锯切操作。本试验重点测试了锯切时关节3在不同转速下的力矩变化。力矩变化测试结果如图11所示。在机械臂准备阶段，此时机械臂关节3的转速为0，力矩曲线平稳。在2 s时，末端链锯开始在不同转速下进行锯切椰子串。在锯切阶段，不同转速的峰值扭矩分别为7.06 N·m、3.18 N·m、−3.04 N·m，表明机械臂在切割时的转速越大，则峰值力矩越大。在最后阶段，锯切完成后，机械臂返回稳定状态。对比分析三条曲线可知，在转速为0.5 r·min^{-1}的条件下进行切割作业时，振荡幅度相对较小，保持在2 N·m内，表明在此特定关节转速下，机械臂链锯切割引起的振动影响处于较低水平，系统表现出较好的稳定性。在整个切割测试过程中，机械臂关节的力矩保持在电机额定力矩范围内，机械臂能够稳定切割嫩椰子簇果柄。

4.2 机器人性能测试

对椰子采摘机器人进行现场测试，随机选取11株椰子树作为试验对象。使用激光测距仪（型号

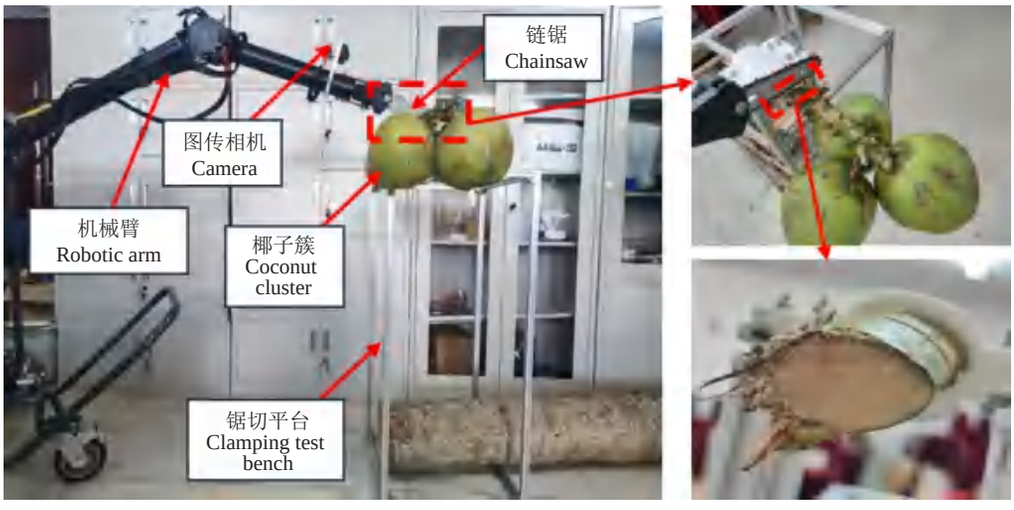


图 10　椰子簇果柄切割试验

Fig. 10　Coconut cluster fruit stalk cutting test

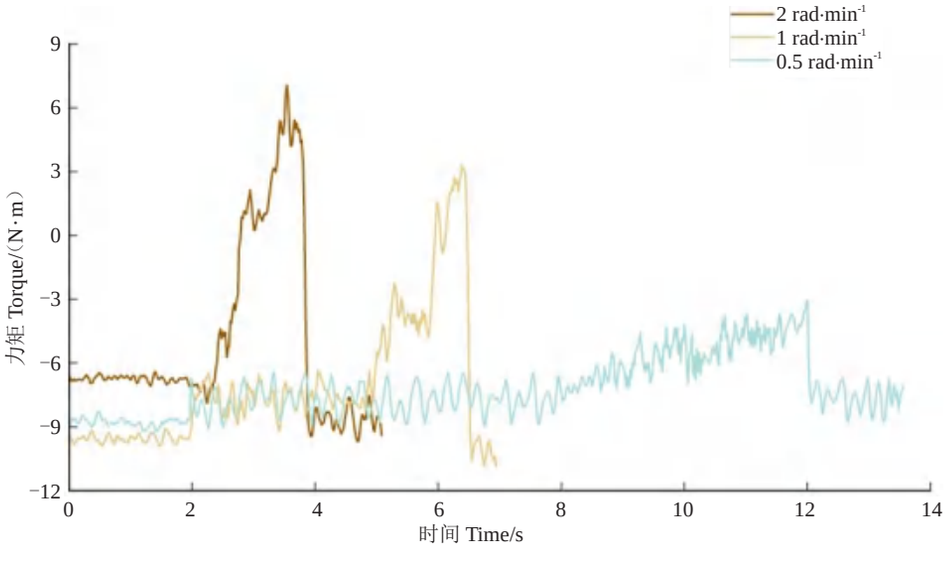


图 11　不同转速下的力矩变化

Fig. 11　Torque changes at different feed speeds

SW- M40A，精度 1.5 mm）、角度测量仪（型号 C8IZl855，精度±0.1°）和卷尺测量 11 株椰子树干的高度、倾角和直径。选择距树干基部 1 m 处并每隔 1 m 作为直径测量点，每个测量点评估 3 次，取其平均值作为椰子树直径，树木参数如表 4 所示。

图 12 展示了椰子采摘机器人的现场工作过程，图 13 为图传系统传输的视频流图像，展示了采摘机器人收获前椰子果柄切割点和链锯的位置以及收获后椰子果柄和链锯的位置。在现场测试中以爬升−采摘−下降为测试流程，记录试验中机器人的爬升时间、采摘时间、下降时间（图 14）。机器人以平均时间 431.98 s 完成了椰子树的爬升−采摘−下降作业，平均攀爬时间和平均采摘时间分别为 107.31 s

表 4　树木参数

Table 4　Tree parameters

树 Tree	树干高 Trunk height/m	树干倾斜度 Trunk inclination/(°)	树干周长变化 Trunk circumference changes/cm
1	6.68	12.3	65.8~68
2	7.72	24.5	91.1~93.2
3	8.05	15.0	79.2~82
4	8.67	18.6	86.4~95.8
5	7.75	23.6	77.6~83.6
6	13.97	20.2	102.4~107.5
7	15.63	15.2	97.6~103.8
8	16.04	14.2	93.8~102.8
9	6.45	11.3	89.8~93.6
10	8.29	10.1	94.7~99.2
11	7.39	15.6	95.2~105.4

A. 机器人固定在树干底部；B. 机器人爬升到树干中部；C. 机器人爬升到椰树冠层下方；D. 机器人开始采摘作业。

A. The robot is fixed at the bottom of the trunk; B. The robot climbs to the middle section of the tree trunk; C. The robot climbs to below the coconut canopy; D. The robot begins the picking operation.

图 12 椰子采摘机器人攀爬与采摘试验

Fig. 12 Coconut picking robot climbing and picking test

图 13 现场测试期间的图传相机画面

Fig. 13 The image of the camera during the field test

和 259.6 s。在测试中，机器人最快爬升速度为 0.14 m·s^{-1}，最慢爬升速度为 0.09 m·s^{-1}，平均爬升速度为 0.12 m·s^{-1}。对于高度相似的椰子树，其攀爬时间受到树干周长和倾斜度的影响。在采摘阶段，机器人需要调整机械臂的姿态，切割椰子簇果柄，平均采摘时间较长。

椰子采摘机器人田间测试结果表明，当椰子簇果柄位于机器人正上方且水平投影小于机器人外形框架时，椰子掉落过程中容易与机器人发生碰撞；而当椰子簇果柄位于机器人侧向以及水平投影大于机器人外形框架时，则不会发生碰撞。因此，在切割操作时，对于容易与机器人发生碰撞的椰子簇果柄，需要将机器人旋转至侧向进行切割，防止碰撞造成机器人损坏。

5 结 论

针对冠层椰子果实环状分布的生长特性，本研究设计了一种集攀爬与采摘功能于一体的椰子采摘

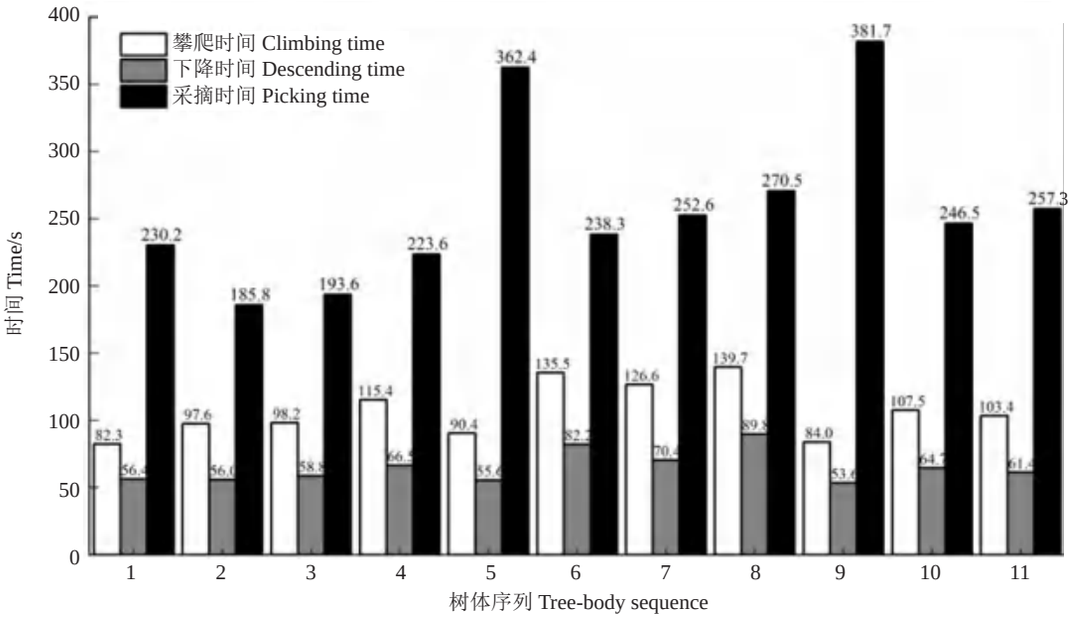


图 14　椰子采摘机器人试验结果

Fig. 14　Coconut picking robot test results

机器人，主要由环绕式爬升装置与四自由度采摘机械臂构成。环绕式爬升装置采用自适应夹持机构设计，能够攀爬不同直径的树干，通过驱动轮环绕树体旋转改变采摘位置，增大椰子采摘的作业范围。通过四自由度机械臂多关节协同控制末端链锯抵达椰子簇果柄的切割位置。

在切割过程中，机械臂关节运动出现一定程度的抖动，但总体趋势较为平稳，能够稳定切割椰子簇果柄。田间试验中，机器人以平均时间 431.98 s 完成了椰子树攀爬、单簇椰子采摘与返回下降的全流程作业，平均攀爬时间和平均单簇椰子采摘时间分别为 107.31 s 和 259.6 s。

在未来研究中，笔者将通过深度学习和 RGB-D 信息融合获取椰子果柄采摘定位点，结合路径规划和柔顺控制算法，实现自主摘椰。

参考文献 References：

[1] 唐龙祥，李阳 . 施用氯化钠对椰子幼苗生理特性的影响[J]. 热带农业科技，2024，47(2)：12-16.
Tang Longxiang，Li Yang. Effects of sodium chloride application on physiological characteristics of coconut seedlings[J]. Tropical Agricultural Science & Technology，2024，47(2)：12-16.

[2] 赵津好，张玉锋，董泽来，阚金涛，陈梦冉，龚涵 . 椰子油酶法提取工艺优化及抗氧化活性评价[J]. 中国粮油学报，2025，40(1)：120-127.
Zhao Jinhao，Zhang Yufeng，Dong Zelai，Kan Jintao，Chen Mengran，Gong Han. Optimization of enzymatic extraction processing of coconut oil extraction and its functional activity study[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association，2025，40(1)：120-127.

[3] 邓宝华，刘保兴，赵闯营，谢德芳，訾纪伟，卢宽，解万翠 . 天然椰子水及其新型营养饮品开发研究进展[J]. 中国果菜，2022，42(6)：26-31.
Deng Baohua，Liu Baoxing，Zhao Chuangying，Xie Defang，Zi Jiwei，Lu Kuan，Xie Wancui. Research progress of natural coconut water and its new nutritional drink development[J]. China Fruit & Vegetable，2022，42(6)：26-31.

[4] 卢琨，侯媛媛 . 海南省椰子产业分析与发展路径研究[J]. 广东农业科学，2020，47(6)：145-151.
Lu Kun，Hou Yuanyuan. Analysis and development path of coconut industry in Hainan province [J]. Guangdong Agricultural Sciences，2020，47(6)：145-151.

[5] 苏明，韩慧敏，林小丽 . 海南椰子机械化摘果技术发展研究[J]. 广西农业机械化，2019(5)：12.
Su Ming，Han Huimin，Lin Xiaoli. Research on the development of mechanized fruit picking technology of coconut in Hainan[J]. Guang Xi Agricultural Mechanization，2019(5)：12.

[6] 张帆，宫杰，范海阔，张强，黄晖，夏文，刘义军，付云飞 . 椰树攀爬装置的关键部件磨损特性分析[J]. 热带农业工程，2018，42(1)：40-45.
Zhang Fan，Gong Jie，Fan Haikuo，Zhang Qiang，Huang Hui，Xia Wen，Liu Yijun，Fu Yunfei. Abrasion characteristics analysis of key components in coconut tree climbing device[J]. Tropical Agricultural Engineering，2018，42(1)：40-45.

[7] Li T，Xie F，Zhao Z Q，Zhao H，Guo X，Feng Q C. A multi-arm robot system for efficient apple harvesting：Perception，task plan and control[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2023，

211：107979.

[8] Yin H S，Sun Q X，Ren X，Guo J L，Yang Y L，Wei Y J，Huang B，Chai X J，Zhong M. Development，integration，and field evaluation of an autonomous citrus-harvesting robot[J]. Journal of Field Robotics，2023，40(6)：1363-1387.

[9] Tituaña L，Gholami A，He Z X，Xu Y J，Karkee M，Ehsani R. A small autonomous field robot for strawberry harvesting[J]. Smart Agricultural Technology，2024，8：100454.

[10] Williams H A M，Jones M H，Nejati M，Seabright M J，Bell J，Penhall N D，Barnett J J，Duke M D，Scarfe A J，Ahn H S，Lim J，MacDonald B A. Robotic kiwifruit harvesting using machine vision，convolutional neural networks，and robotic arms[J]. Biosystems Engineering，2019，181：140-156.

[11] 崔宏伟，路晓轩，杨亚青，卢芯仪，马溟，姬江涛，金鑫，李秀珍，赵紫梦，曾宁宁 . 智慧化果园关键生产技术研究现状与进展[J]. 果树学报，2025，42(7)：1582-1609.
Cui Hongwei，Lu Xiaoxuan，Yang Yaqing，Lu Xinyi，Ma Hao，Ji Jiangtao，Jin Xin，Li Xiuzhen，Zhao Zimeng，Zeng Ningning. Research status and progress on key technologies of intelligent orchard[J]. Journal of Fruit Science，2025，42(7)：1582-1609.

[12] Silwal A，Davidson J R，Karkee M，Mo C，Zhang Q，Lewis K. Design，integration，and field evaluation of a robotic apple harvester[J]. Journal of Field Robotics，2017，34(6)：1140-1159.

[13] 冯青春，赵春江，李涛，陈立平，郭鑫，谢丰，熊子聪，陈凯文，刘城，严童杰 . 苹果四臂采摘机器人系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2023，39(13)：25-33.
Feng Qingchun，Zhao Chunjiang，Li Tao，Chen Liping，Guo Xin，Xie Feng，Xiong Zicong，Chen Kaiwen，Liu Cheng，Yan Tongjie. Design and test of a four-arm apple harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2023，39(13)：25-33.

[14] 王佳虹，王迪，叶宏宝，朱国宏，晏毓 . 猕猴桃采摘机器人设计及试验[J]. 浙江农业科学，2023，64(10)：2418-2422.
Wang Jiahong，Wang Di，Ye Hongbao，Zhu Guohong，Yan Yu. Design and experiment of kiwifruit picking robot[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences，2023，64(10)：2418-2422.

[15] 李健，李行行，张伟，王泉澎，李海东 . 攀爬式椰子采摘机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2025，46(8)：1-6.
Li Jian，Li Hanghang，Zhang Wei，Wang Quanpeng，Li Haidong. Design and experiment of climbing coconut picker[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2025，46(8)：1-6.

[16] 杨永，曾祥坤 . 一种椰子抓取采摘机械手设计及其工作空间仿真分析[J]. 农机化研究，2015，37(5)：132-135.
Yang Yong，Zeng Xiangkun. Design of the manipulator for picking coconut and simulation of its work space[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2015，37(5)：132-135.

[17] 苏明，周汉，陈丹萍 . 实用型椰子摘果机开发研究[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊)，2021(1)：153-154.
Su Ming，Zhou Han，Chen Danping. Research on the development of practical coconut fruit picker[J]. Management & Technology of SME，2021(1)：153-154.

[18] 周中华，付宗国，罗准，申超男 . 新型椰子采摘装置的设计研究[J]. 新技术新工艺，2020(1)：29-32.
Zhou Zhonghua，Fu Zongguo，Luo Zhun，Shen Chaonan. Design research on a new coconut picking device[J]. New Technology & New Process，2020(1)：29-32.

[19] 王禹涵，邵丽颖，姜思达，谭殷霖 . 椰子采摘机器人机械系统设计[J]. 工程机械，2023，54(12)：111-114.
Wang Yuhan，Shao Liying，Jiang Sida，Tan Yinlin. Design of mechanical system of coconut picking robot[J]. Construction Machinery and Equipment，2023，54(12)：111-114.

[20] Kumar K S S，Rzymkowski C. Design of agricultural type coconut climbing and plucking robot[J]. Pomiary Automatyka Robotyka，2020，24(2)：23-29.

[21] Dubey A P，Pattnaik S M，Banerjee A，Sarkar R S K. Autonomous control and implementation of coconut tree climbing and harvesting robot[J]. Procedia Computer Science，2016，85：755-766.

[22] Subramanian P，Sankar T S. Development of a novel coconut-tree-climbing machine for harvesting[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines，2023，51(5)：2757-2775.

[23] Maheswaran S，Sathesh S，Saran G，Vivek B. Automated coconut tree climber[C]//2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2). June 23-24，2017，Coimbatore，India. IEEE，2017：1-6.

[24] Megalingam R K，Manoharan S K，Mohandas S M，Vadivel S R R，Gangireddy R，Ghanta S，Kumar K S，Teja P S，Sivanantham V. Amaran：An unmanned robotic coconut tree climber and harvester[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2021，26(1)：288-299.