

芒果采收车机械臂运动特性分析及试验

刘世豪¹, 王 菲¹, 林 茂¹, 刘俊孝¹, 姚克恒^{2*}

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘 要: 为提高芒果采收车机械化采摘的适应性, 该研究采用多体动力学理论方法对其机械臂的运动特性进行分析。首先, 结合芒果生长和农艺特征及采摘机械臂几何构型与向量特性, 运用 D-H 法建立了机械臂运动学模型以探索其运动特性, 并进行末端执行器运动轨迹规划。轨迹规划结果表明末端执行器运动平稳, 满足芒果采摘运动要求。进一步地, 利用拉格朗日法构建了机械臂的动力学模型, 对其进行了正逆动力学仿真验证, 以深入了解机械臂的关节运动特性。动力学分析结果表明, 在恒力矩工况下, 伸缩装置和摆动装置的运动呈现一定的周期性, 摆动装置、旋转装置角加速度和伸缩装置加速度均约在 1.25、2.3、4.15 s 达到阶段峰值; 在仅做摆动周期运动的情况下, 旋转装置、摆动装置所受驱动力矩均近似呈周期性变化, 峰值分别为 72.5 与 52 N·mm, 且在一个运动周期内, 均有两个极大值点。对机械臂结构进行仿真模态计算和模态试验, 结果表明前六阶固有频率误差在 5% 以内, 验证了芒果采收车机械臂多体动力学仿真建模的准确性。研究结果可为保证有效实现机械臂的采摘效果及提高其可靠性与稳定性提供依据。

关键词: 农业机械; 模型; 芒果采收; 采摘; 机械臂; 动力学; 运动学特性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306172

中图分类号: TP242.3; S225.93

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0058-10

刘世豪, 王菲, 林茂, 等. 芒果采收车机械臂运动特性分析及试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 58-67. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306172 <http://www.tcsae.org>

LIU Shihao, WANG Fei, LIN Mao, et al. Analysis and test of the kinematics characteristics of the robotic arm for a mango harvesting vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 58-67. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306172 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

芒果被誉为热带水果之王, 因其口感绵滑、味甜芳香、营养价值高而深获消费者喜爱^[1]。中国是芒果生产大国之一, 产地主要分布在海南、广东、广西、云南等省区^[2], 现今其采摘方式也主要依靠人工完成, 不仅采摘效率低, 而且随着城市化推进和农村劳动力减少, 人工采摘成本也不断增加^[3]。为适应芒果采摘方式转型升级需求, 亟需采收机械代替人工完成繁重的芒果采收工作。当前关于芒果采收机械设计的研究, 主要聚焦于机械结构设计及力学分析。任智晓等^[4]针对高空芒果采摘难度大的问题, 设计了一种智能式芒果高空采摘车, 通过进行强度、刚度校核及极限工况下的采摘试验, 验证其实用性。张锋斌等^[5]通过对研制的智能芒果采收车进行静力学分析, 验证该装置的可行性。张燕等^[6]设计了一套液压控制的新型芒果采摘机, 可解决芒果大面积收获时采摘慢、费时费力等不足之处。何浩等^[7]设计了一种可伸缩灵活多用的芒果采摘机构, 采用滚轮式机架, 利用伸缩式采摘杆通过调节其长度来实现对不同高度芒

果的采摘。

果蔬采摘机械的动态特性会影响采摘作业的质量^[8], 因此需要对采摘机械臂进行运动分析以保证采摘的成功率。周宇杰等^[9]建立了名优茶采摘机械臂的运动学和动力学模型, 并采用 Bézier 曲线对采摘轨迹进行改进, 提高了采摘运动的平滑性。李国利等^[10]提出了一种多末端采摘机械手结构方案, 由此建立了运动学模型, 并对机械臂样机进行了运动学分析与采摘试验, 结果显示末端执行器位置误差较小且采摘成功率较高。冯青春等^[11]针对黄瓜的特定栽培模式, 建立了采摘机械臂运动学模型, 并应用三次多项插值法建立关节空间运动规划模型, 仿真结果表明机械臂采摘范围满足工作目标要求。YE 等^[12]建立了分析柔性体最大变形问题的甘蔗叶采摘有限元模型, 对甘蔗叶采摘过程进行动态模拟, 获得甘蔗叶与弹性齿的应力场变化及运动姿态, 该模型可用于优化和改进采摘机械性能。国内外研究人员在果蔬采摘机械的动态特性分析方面的研究取得了一些显著进展, 但缺乏普适性, 需要针对性地研究解决不同果蔬、不同环境下的动态特性问题, 进一步提高采摘作业的质量和效率。

当前针对芒果采摘机械臂的动态特性, 尚未进行系统深入的理论探索。在采摘过程中的运动学特性、受力响应, 及其与芒果农艺特征之间的相互影响等都是当前研究中尚未深入探讨的方向。理论研究的不足使得对芒果采摘机械臂在实际操作中面临的动力学问题以及采摘效果的问题难以解决。针对以上问题, 本文在深入研究

收稿日期: 2023-06-25 修订日期: 2023-12-26

基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目 (521RC496)

作者简介: 刘世豪, 博士, 教授, 研究方向为机械优化设计方法。

E-mail: liushihao1102@126.com

*通信作者: 姚克恒, 副研究员, 研究方向为农业机械设计与制造技术。

E-mail: yaokeheng@qq.com

海南芒果的种植环境、生长特点及采摘农艺的基础上，设计了一种集行走、升降和采收功能的芒果采收车，并结合 D-H 法建立该型采收车机械臂的运动学模型，探索末端执行器的运动空间规划，以确保采摘运动的平稳性。采用拉格朗日法构建机械臂的动力学模型，揭示机械臂的关节的运动规律和动态性能。最后进行振动分析与试验验证，以提高机械臂的可靠性和稳定性。

1 芒果采收车整体设计

1.1 芒果农艺特征

芒果种植区域不仅仅分布在地势平坦地区，相当一部分的芒果还种植在斜坡区域^[13-14]。海南种植的芒果树树冠高度一般约为 250~300 cm，主枝分生高度约为 40~50 cm，芒果果实主要生长分布范围为 50~200 cm，不同品种具有一定差异^[15]。

海南芒果的成熟期比较集中，作业条件比较特殊，通常需要在距地面一定高度的情况下采摘，采摘作业既要及时，又要确保果实质量及人、树安全^[16]。当前芒果机械化采摘面临的首要问题是成熟芒果的分布位置相对随机，导致采摘过程中的作业动作相对较为复杂，这要求采收车机械臂在实际作业中具备较强的运动学适应性；此外，由于成熟芒果的果皮易损伤，机械臂还必须具备较好的力学性能。总之，为了适应芒果的特殊生长情况和农艺需求，采收车设计不仅要使机械结构合理，还需注重作业动作的优化，以提高采摘的成功率和效率。

1.2 芒果采收车结构与工作原理

根据海南芒果生长特点，设计的芒果采收车主要分为行走装置与采摘平台两部分，其样机模型如图 1 所示，相关技术参数如表 1 所示。为适应不同地势作业，该芒果采收车采用六足行走装置，实现采收车在作业区域的平稳行驶；采摘平台集成了机械臂、收集框和果实识别摄像头。



1. 行走装置 2. 升降装置 3. 旋转装置 4. 摆动装置 5. 伸缩装置 6. 双目摄像头 7. 末端执行器 8. 收集装置
1. Walking device 2. Lifting device 3. Rotating device 4. Swing device 5. Telescopic device 6. Binocular camera 7. End effector 8. Collecting device

图 1 芒果采收车
Fig.1 Mango harvesting vehicle

为满足芒果采摘作业要求，结合芒果生长位姿特点

和复杂的采摘环境，设计了包括升降装置、旋转装置、摆动装置、伸缩装置、双目摄像头和末端执行器的 4 自由度关节型机械臂。该机械臂具有灵活敏捷、体积小巧与工作空间大等优点。升降装置能实现不同高度芒果的采摘，旋转装置用于实现同一高度上不同方位芒果的采摘。摆动装置用于保障小范围内芒果采摘的灵活性。伸缩装置用于实现同一高度和方位但在不同距离上芒果的采摘，末端执行器用于芒果采摘动作的完成，需要考虑芒果生长特性。重力状态下，果梗大多位于果实上方且与水平线呈锐角姿态^[10]。由于品种差异，不同的芒果果实质量在 50~1 000 g 之间，因此设计的末端执行器承载负重较小。

表 1 芒果采收车技术参数
Table 1 Mango harvesting vehicle's technical parameters

参数 Parameter	值 Value
行走装置尺寸（长×宽） Walking device dimensions (length × width)/(mm × mm)	700×450
最大高度 Max height/mm	2 720
升降高度 Lifting height/mm	800
整机功率 Power of complete equipment/W	1 300
额定负载 Rated load/kg	200
机械臂展 Mechanical arm span/mm	1 300
识别成功率 Recognition success rate/%	≥95
采摘成功率 Picking success rate/%	≥90
果实损伤率 Fruit damage rate/%	≤5
采摘速度 Picking speed/(个·s ⁻¹)	≤5
最大行走速度 Max walking speed/(m·s ⁻¹)	1
最小转弯半径 Min turning radius/m	0.3
左右倾侧度 Lateral inclination/(°)	≤10
爬坡度 Gradeability/(°)	≤10
工作电压 Working voltage/V	48

在作业过程中，通过双目摄像头判定视野内可采摘芒果的区域，引导行走装置行走到适当的采摘点，再通过双目摄像头识别可采摘的芒果果实，并定位其所在位置。根据可采摘芒果的位置，驱动升降装置、旋转装置、摆动装置、伸缩装置协同作用，确定末端执行器工作位置，驱动末端执行器工作，从而重复实现芒果的机械化采摘。

2 采摘机械臂运动学与动力学分析

芒果采摘机械臂在作业时，受力情况复杂，对其采摘过程进行运动学与动力学分析，研究各部位的受力情况可以了解系统在执行采摘动作时的薄弱环节，有利于在设计阶段进行结构优化，尽量避免机械臂在采摘过程中发生故障或损坏^[17]。

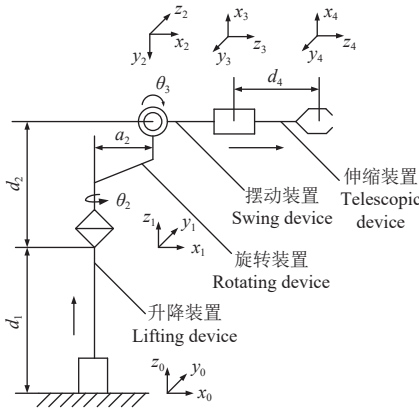
2.1 采摘机械臂运动学特性

本文在充分考虑芒果采摘机械臂的几何构型与向量特征情况下，建立正运动学模型，并对机械臂进行逆运动学求解。机械臂逆运动学是路径规划和伺服控制的基础^[18]，通过应用逆运动学求解出目标位姿相对应的各关节角度，验证目标位姿的合理性，从而实现机械臂采摘路径的合理规划。

2.1.1 采摘机械臂正运动学建模

机械臂的正运动学问题是通过关节变量来确定末端执行器的位置和姿态^[19]，采用 D-H 法^[20]构建机械臂的

各连杆坐标系, 如图 2 所示。D-H 法通过建立坐标系、连接关节和描述关节运动的参数来建立机械臂的运动学模型。该机械臂的 D-H 参数描述了一个具有 4 个自由度的机械臂的几何结构和运动学特性, 其中的变量包括连杆长度 a_i 、旋转角度 α_i 、关节偏移量 d_i 和关节旋转角度 θ_i , 这些参数共同定义了机械臂各个关节之间的几何关系。取值范围的设定考虑到机械臂的灵活性和适应性, 确保机械臂在运动中能够满足实际工作需求, 其中 d_1 在 z 轴上平移范围为 $0 \sim 800$ mm, d_4 在 z 轴上的平移范围为 $200 \sim 400$ mm, 确保机械臂在垂直方向上具有一定的可调性。 θ_2 旋转范围在 $-\pi$ 到 π 之间, 即允许关节绕 z 轴进行完整的 360° 旋转, 确保机械臂在水平方向上具有足够的灵活性, θ_3 旋转范围在 $-3\pi/2$ 到 $\pi/2$ 之间, 确保机械臂能够在垂直方向向上及向下灵活操作, 适应芒果树分布的不同高度。 a_2 、 d_2 为固定量, $a_2=60$ mm, $d_2=80$ mm。



注: a_i 为沿着 x_{i-1} 轴方向 z_{i-1} 轴与 z_i 轴之间的距离, 为正, mm; α_i 为绕着 x_i 轴从 z_{i-1} 轴旋转到 z_i 轴的夹角, 逆时针为正, 顺时针为负, rad; d_i 为沿着 z_{i-1} 轴方向 x_{i-1} 轴与 x_i 轴之间的距离, 与 z_{i-1} 轴正向一致, mm; θ_i 为绕着 z_{i-1} 轴从 x_{i-1} 轴旋转到 x_i 轴的夹角, 逆时针为正, 顺时针为负, rad; (x_i, y_i, z_i) 为机械臂关节 i 的坐标系, (x_0, y_0, z_0) 为基坐标系。

Note: a_i is the distance between the z_{i-1} axis and the z_i axis along the x_{i-1} axis direction, which is positive, mm; α_i is the angle between the z_{i-1} axis and the z_i axis around the x_i axis. Counterclockwise is positive, clockwise is negative, rad; d_i is the distance between the x_{i-1} axis and the x_i axis along the z_{i-1} axis, which is consistent with the positive direction of the z_{i-1} axis, mm; θ_i is the distance from the x_{i-1} axis to the x_i axis around the z_{i-1} axis Angle, counterclockwise is positive, clockwise is negative, rad; (x_i, y_i, z_i) is the coordinate system of the manipulator joint i , and (x_0, y_0, z_0) is the base coordinate system.

图 2 机械臂的 D-H 坐标系

Fig.2 D-H coordinate system of the robotic arm

由 D-H 法, 机械臂坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的齐次变换矩阵 T_i 为几个子变换矩阵的乘积:

$$T_i = \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \text{Rot}(x_i, \alpha_i) \text{Trans}(x_i, a_i)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

利用上式可得机械臂正运动学模型:

$${}^0T_4 = T_1 T_2 T_3 T_4 \quad (2)$$

将参数数据代入式 (1) 可得:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

将 $T_1 \sim T_4$ 代入式 (2) 可得采摘机械臂正运动学模型:

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 \sin \theta_3 & a_2 \cos \theta_2 - d_4 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ \cos \theta_3 \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \sin \theta_3 & a_2 \sin \theta_2 - d_4 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ -\sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & d_1 + d_2 - d_4 \cos \theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.1.2 采摘机械臂逆运动学求解

正运动学建模是逆运动学分析的基础, 机械臂的逆运动学问题是通利用末端执行器的位置、姿态来求解对应的关节变量^[21]。逆运动学的求解过程也是一个关节变量解耦的过程^[22]。根据机械臂结构特点, 本文采用变量分离法^[23]对其进行求解, 将已知的机械臂末端位姿矩阵连续左乘相邻关节坐标关系的逆矩阵, 令其与各个关节的坐标矩阵连续相乘的矩阵对应位置的元素相等, 得到一个可以求解的三角函数方程式, 重复上述过程, 直到解出所有未知数为止。

机械臂的运动学方程为:

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_1 T_2 T_3 T_4 \quad (4)$$

用逆矩阵 T_1^{-1} 左乘以上矩阵方程, 可得:

$$T_1^{-1} T_4 = T_2 T_3 T_4 \quad (5)$$

令式 (5) 左、右边矩阵的 (1,2) 元素 (即式 (5) 两边矩阵第一行第二列的元素, 以下与此相同) 相等, 可得:

$$o_x = \sin \theta_2 \quad (6)$$

解得:

$$\theta_2 = \arcsin o_x \quad (7)$$

令式 (5) 左、右边矩阵的 (3,3) 元素相等, 可得:

$$a_z = -\cos \theta_3 \quad (8)$$

解得:

$$\theta_3 = \arccos(-a_z) \quad (9)$$

令式 (5) 左、右两边矩阵的 (2,4) 元素相等, 可得:

$$p_y = a_2 \sin \theta_2 - d_4 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \quad (10)$$

把式 (7)、式 (9) 代入式 (10), 可得:

$$d_4 = \frac{a_2 o_x - p_y}{o_x \sin[\arccos(-a_z)]} \quad (11)$$

令式 (5) 左、右两边矩阵的 (3,4) 元素相等, 可得:

$$p_z - d_1 = d_2 - d_4 \cos \theta_3 \quad (12)$$

将式 (9)、式 (11) 代入式 (12), 可得:

$$d_1 = p_z - d_2 - \frac{a_z(a_2 o_x - p_y)}{o_x \sin[\arccos(-a_z)]} \quad (13)$$

2.1.3 笛卡尔轨迹规划

机械臂在执行芒果采摘任务时, 从芒果采摘到放入收集篮这个过程, 必须保证末端执行器运动的平稳性, 从而确保芒果在此过程中不掉落。在已知末端执行器初始和末端位姿的情况下, 就可以用笛卡尔空间运动规划对机械臂的末端执行器进行轨迹规划, 求得轨迹中插补点的位姿, 从而得到末端执行器的运动空间轨迹^[24]。

由于芒果在树上呈随机分布, 因此随机选取一处芒果位置, 并将其映射为机械臂末端执行器的初始位姿 T_b :

$$T_b = \begin{bmatrix} 0.750 & -0.500 & -0.433 & -82.000 \\ -0.433 & -0.866 & 0.250 & 47.500 \\ -0.500 & 0 & -0.866 & 310.000 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将上式代入式 (7), (9), (11), (13) 解得 $\theta_2 = -\pi/6$, $\theta_3 = \pi/6$, $d_1 = 498.4364$, $d_4 = 309.9727$, 各变量都在取值范围内, 说明任选的末端执行器初始位姿合理。

芒果采摘完需放入收集篮中, 在收集篮上方任选一位置为末端执行器末端位姿 T_t :

$$T_t = \begin{bmatrix} 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0.7071 & 0 & -0.7071 & -100.0000 \\ -0.7071 & 0 & -0.7071 & 400.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (15)$$

将上式代入式 (7), (9), (11), (13) 解得 $\theta_2 = \pi/2$, $\theta_3 = \pi/4$, $d_1 = 479.9969$, $d_4 = 226.2720$, 各变量都在取值范围内, 说明任选的末端执行器末端位姿合理。

根据已知的末端执行器初始和末端位姿, 通过调用 Matlab 中 `ctrj` 函数对机械臂进行笛卡尔空间运动轨迹规划, 轨迹规划如图 3 所示。

为了实现机械臂从初始姿态到终止姿态的快速、平滑过渡, 需要机械臂在运动和停止过程中保持平稳, 不能出现突然加速或突然减速的现象。图 3a 显示了末端执行器完成一次芒果采摘到收集过程末端执行器平移变化, 图 3b 显示了其旋转变化的变化, 其中 x 轴、 z 轴旋转角度为 0, 图 3c 显示了末端执行器的此过程在 x 、 y 、 z 坐标内随时间变化曲线。从图 3 可以看出, 在完成一次芒果采摘到收集过程中机械臂的末端执行器运动轨迹、平滑、稳定、连续且无突变, 运动空间始终保持在关节运动允许的范围内, 达到了设计要求。

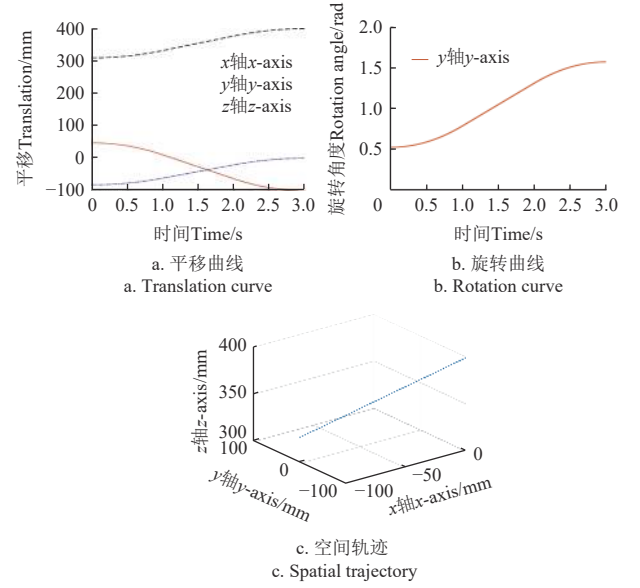


图 3 末端执行器轨迹

Fig.3 Trajectory of the end effector

2.2 采摘机械臂动力学特性分析

为了便于研究机械臂各关节的运动性能, 对机械臂进行动力学分析, 研究作用在其上的力和力矩与其各关节的运动关系。

2.2.1 动力学方程的建立与求解

针对芒果采收车在采摘过程中的运动问题, 采用拉格朗日法^[25]对其进行了动力学建模。选取广义变量为 $q = [x, y, z, \theta_1, \theta_2, \varphi]$, 其中 x 、 y 、 z 分别表示车辆在水平平面上的位置和垂直方向的高度, θ_1 表示绕垂直轴的旋转角度, θ_2 表示绕水平轴的旋转角度, φ 为其他可能的角度。机械臂动力学模型的一般方程如下:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} = Q_k \quad (16)$$

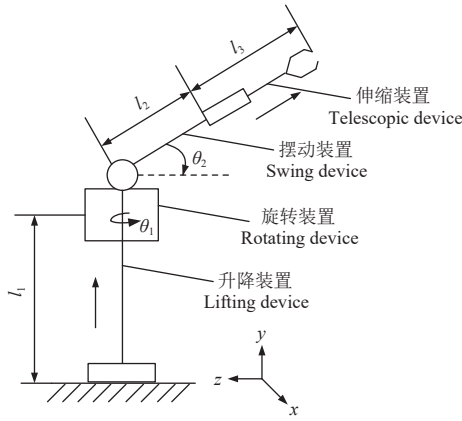
式中 T 为机械臂的动能, J ; U 为机械臂的势能, J ; Q_k 为机械臂受到的非保守广义力, N 。

由式 (16) 可知: 为了得到机械臂的动力学方程, 需要分别计算机械臂的动能、势能及广义力。

2.2.2 机械臂动能

机械臂动力学模型如图 4, 摆动装置、伸缩装置的长度分别为 l_2 和 l_3 , 设其质量分别为 m_2 和 m_3 , 分别计算旋转装置、摆动装置的转动动能, 其中旋转装置仅绕 y 轴转动, 摆动装置和伸缩装置的旋转运动则可以被分解成绕旋转装置的旋转运动与绕 y 轴旋转运动; 此外, 设旋转装置的质量为 m_1 , 由于升降平台采用轻质材料, 相对旋转装置、摆动装置和伸缩装置, 移动平台与升降平台的重量可忽略不计, 计算伸缩装置和机械臂的平动动能, 从而得到机械臂总动能为

$$T = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{12} m_3 l_3^2 + m_3 \left(l_2 + \frac{l_3}{2} \right)^2 \right] + \left(\dot{\theta}_2^2 + \cos^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \right) + \frac{1}{2} (m_1 + m_2 + m_3) (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) \quad (17)$$



注: l_i 为装置的长度, m ; θ_j 为装置旋转的角度, 逆时针为正, 顺时针为负, rad.

Note: l_i is the length of the device, m ; θ_j is the angle of rotation of the device, which is positive for counterclockwise and negative for clockwise, rad.

图4 机械臂动力学模型坐标系示意图

Fig.4 Diagram of robotic arm dynamics model coordinate system

2.2.3 机械臂势能

选取升降装置底部所处的平面作为零势能面, 则可计算出旋转装置、摆动装置、伸缩装置的势能, 从而得到系统总势能为

$$U = (m_1 + m_2 + m_3)gl_1 + \left(\frac{1}{2}m_2 + m_3\right)gl_2 \sin \theta_2 + \frac{1}{2}m_3gl_3 \sin \theta_2 \quad (18)$$

2.2.4 机械臂动力学方程

假定摆动装置与伸缩装置、摆动装置与旋转装置、旋转装置与升降平台连接处的摩擦力为 0, 移动平台与地面之间的摩擦系数为 μ , 则机械臂受到的非保守广义力为

$$Q_k = \begin{bmatrix} [F - \mu(m_1 + m_2 + m_3)]g \cos \alpha \\ F_Y \\ [F - \mu(m_1 + m_2 + m_3)]g \sin \alpha \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中 F 为机械臂整体移动的驱动力, N; α 为前进方向与 x 轴的夹角, rad; F_Y 为升降平台的驱动力, N; g 为重力加速度, m/s^2 ; τ_1 、 τ_2 、 τ_3 分别为施加在旋转装置、摆动装置、伸缩装置的驱动力矩, N·m. 将式 (17)、(18) 和 (19) 代入式 (16) 中, 得到机械臂的动力学方程为

$$M\ddot{q} + H\dot{q}^2 + F_z = 0 \quad (20)$$

其中, M 反映了系统惯性对动力学的影响; M 、 H 、 F_z 如式 (21)~(23) 所示。

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中:

$$M_{11} = M_{22} = M_{33} = m_1 + m_2 + 2m_3$$

$$M_{44} = \left[\frac{1}{3}m_2l_2^2 + \frac{1}{12}m_3l_3^2 + m_3\left(l_2 + \frac{l_3}{2}\right)^2 \right] \cos^2 \theta_2$$

$$M_{55} = \frac{1}{3}m_2l_2^2 + \frac{1}{12}m_3l_3^2 + m_3\left(l_2 + \frac{l_3}{2}\right)^2$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \left(\frac{1}{3}m_2l_2^2 + m_2l_2l_3 + m_3l_2^2 + \frac{1}{3}m_3l_3^2\right) \cos \theta_2 \sin \theta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$F_z = \begin{bmatrix} -[F - \mu(m_1 + m_2 + m_3)]g \cos \alpha \\ -F_Y \\ -[F - \mu(m_1 + m_2 + m_3)]g \sin \alpha \\ -\tau_1 \\ \left(\frac{1}{2}m_2 + m_3\right)gl_2 \cos \theta_2 + \frac{1}{2}m_3gl_3 \cos \theta_2 - \tau_2 \\ -\tau_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

机械臂动力学模型描述了机械臂在驱动力(矩)作用下的运动状态, 对其求解可得到机械臂驱动力与其运动规律之间的关系。

2.3 采摘机械臂动力学仿真

为了验证机械臂动力学方程, 并基于此求解机械臂运动状态下的结构参数与运动参数, 将在 SoildWorks 软件中建立的芒果采收车机械臂三维参数化模型导入 Adams 软件中, 调整空间位置与角度并为各个部件接附点添加运动副, 建立芒果采摘机械臂多体动力学模型, 如图 5 所示。

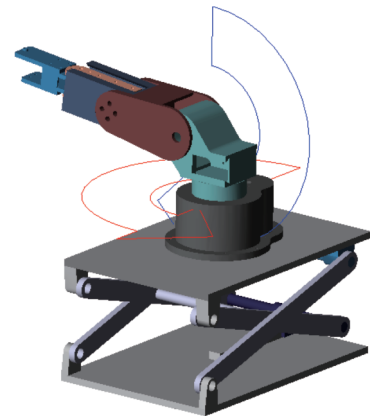


图5 采摘机械臂多体动力学模型

Fig.5 Multibody dynamics model of harvesting robotic arm

通过在 Adams 软件中对主要部件接附点施加驱动或力矩来控制部件的运动, 以仿真分析机械臂及其各个部件的运动与受力情况, 直观地展示采摘机械臂的空间运动状态及规律, 有利于更好地研究机械臂系统传动特性, 进行系统能量计算。基于机械臂的简化模型设定机械臂

动力学模型的仿真参数，其中，重力加速度 g 为 9.8 m/s^2 ；旋转装置质量 m_1 为 9.510 kg ；摆动装置长度 l_2 为 0.6 m ，质量 m_2 为 6.683 kg ；伸缩装置质量 m_3 为 6.980 kg ；摩擦系数 μ 为 0.1 。

芒果采摘机械臂动力学分析是对机械臂运动过程中的力学特性进行深入研究的关键环节，其主要包括正向动力学分析和逆向动力学分析两个方面。在正向动力学分析中，关注在恒力矩工况下机械臂的运动情况，设定了摆动装置和旋转装置的驱动力矩为 $0.05 \text{ N}\cdot\text{m}$ ；而逆向动力学分析则更关注在给定运动规律下机械臂的受力情

况，设定摆动装置的运动周期为 3 s ，摆动的角度为 120° ，以模拟实际采摘过程。

2.3.1 机械臂正向动力学仿真

正向动力学仿真旨在通过已知的机械臂模型，对机械臂末端执行器的运动进行模拟，重点关注机械臂在恒定力矩驱动下的动力学响应^[26]，基于对实际工况的考虑、系统稳定性的需求以及计算效率的综合分析，在 Adams 软件环境中设定施加在摆动装置和旋转装置的驱动力矩为 $0.05 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，可得在此工况下芒果采摘机械臂的运动规律如图 6 所示。

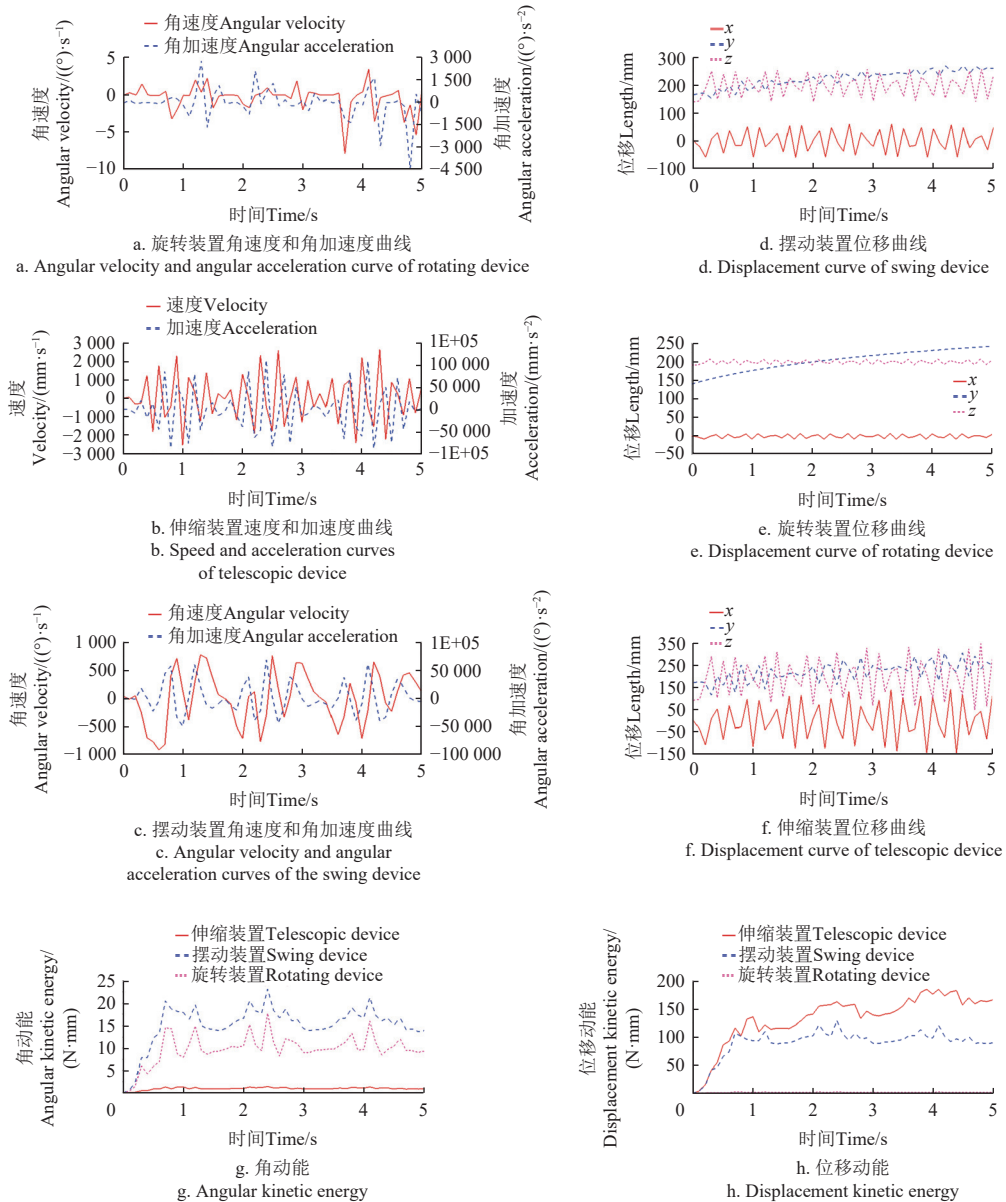


图 6 机械臂主要装置运动规律

Fig.6 Movement law of the main device of the robotic arm

从图 6 可以看出，在恒力矩工况下，摆动装置转动速度和伸缩装置速度均呈现周期性变化，摆动装置角速度的变化周期约为 1.6 s ，伸缩装置速度的变化周期约为 1.5 s ，旋转装置转动速度变化无明显规律；摆动装置、旋转装置角加速度和伸缩装置加速度约在 1.25 、 2.3 、

4.15 s 达到阶段峰值；机械臂各个部件在 x 、 y 、 z 三轴方向的位移规律相似，均伴随一定程度的波动，且沿水平方向上的位移较小，部件位移大小和动能随着该部件的运动速度逐步增加。正向动力学分析通过研究芒果采收车机械臂在运动过程中的力学特性和运动规律，更好地

展示机械臂的运动特性,为机械臂的后续优化设计与控制提供理论支持,从而更好地提高芒果采收车机械臂的运动精度和稳定性。

2.3.2 机械臂逆向动力学仿真

逆向动力学主要分析芒果采收车机械臂在给定运动规律的情况下所受驱动力(矩)的变化情况^[27]。本文重点研究机械臂在做周期运动时关节处所受的驱动力变化情况。在 Adams 环境中,设定摆动装置的运动周期为 3 s,摆动的角度为 120°,可得到摆动装置所受驱动力矩情况如图 7 所示,从所求力矩曲线可以看出正向动力学驱动力矩取值合理。

从图 7a 可以看出,旋转装置与摆动装置所受驱动力矩分布与其运动周期具有近似的周期性变化;在一个运动周期内,旋转装置与摆动装置峰值分别为 72.5 N·mm 与 52 N·mm,均有两个极大值点。当采摘机械臂仅有摆动装置运动时,为了平衡其重力的影响,需要给移动副施加驱动力,其规律如图 7b 所示,除力的大小以外驱动力曲线运动规律基本一致,对采摘机械臂进行动力学特性分析能够为识别和保证机械系统的性能提供理论依据。

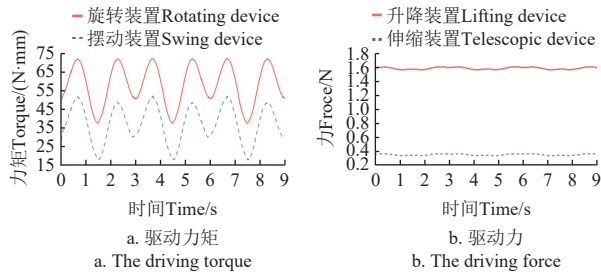


图 7 机械臂主要装置受力(矩)情况

Fig.7 The force (torque) of the main device of the robotic arm

3 模型验证与分析

采摘机械臂的振动会影响采摘的精度和稳定性^[28-30],故须对机械臂进行振动分析,具体包括模态及频率响应函数的计算分析。为了便于研究芒果采摘机械臂的振动影响,基于上文建立的机械臂多体动力学模型,将机械臂主体部分转化为柔性体,通过调用 Adams/Vibration 模块进行振动分析,以研究其底部振动激励对末端执行器运动的影响。

3.1 模态计算及试验验证

模态计算是对结构进行振动分析的前提,对结构进行模态计算能够了解机械臂的固有频率等动态属性,便于后续研究机械臂系统的动态响应^[31-32]。对于每一个模态 i ,其动力学方程可以表示为:

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{C}_i \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{K}_i \mathbf{q}_i = 0 \quad (24)$$

式中 \mathbf{M}_i 是质量矩阵, \mathbf{C}_i 是阻尼矩阵, \mathbf{K}_i 是刚度矩阵 \mathbf{q}_i 是模态 i 的广义坐标。

在 Adams 中基于主体柔性化后的采摘机械臂多体动

力学模型,调用 Linear 模块进行自由模态计算。Adams/Linear 模块首先求解模态参数,包括质量矩阵 \mathbf{M}_i 、阻尼矩阵 \mathbf{C}_i 和刚度矩阵 \mathbf{K}_i 。对于每一个模态 i ,通过求解其动力学方程,得到广义坐标 \mathbf{q}_i 随时间的变化;最后根据求解得到的广义坐标,计算结构的各阶固有频率,其结果如图 8 所示,其中实部表示系统的稳定性,负数表示系统稳定,正值表示不稳定;在这个系统中,只有其中一阶模态的实部为正值,证明系统稳定性良好。

按照图 9 设置好模态试验分析系统,在机械臂上选择合适的激励点和测点,利用力锤锤击激励点后得到各点的激振力信号及相应的响应信号。利用模态分析软件拟合各测点的频响函数,并通过分析频响函数曲线来识别机械臂的固有频率。模态试验完成后,最终得到机械臂前 6 阶固有频率的试验值与用 Adams/Linear 模块求出的仿真值对比如表 2 所示。由表 2 可知,机械臂前六阶固有频率的仿真值与试验值之间的误差较小,证明前文建立的芒果采摘机械臂多体动力学仿真模型是合理可行的,从而为后续频率响应分析提供了可靠的仿真模型。

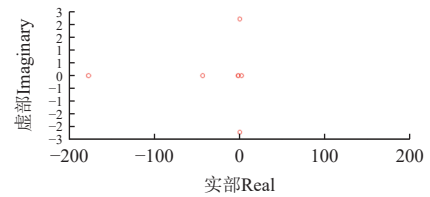
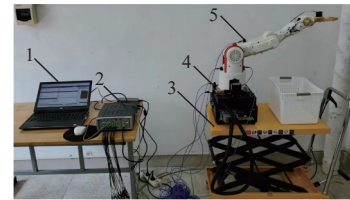


图 8 系统模态

Fig.8 System modals



1.计算机 2.LMS 模态测试仪 3.试验样机 4.力锤 5.加速度传感器
1. Computer 2. LMS modal tester 3. Experimental prototype 4. Hammer 5. Acceleration sensor

图 9 试验现场

Fig.9 Experimental field

按照图 9 设置好模态试验分析系统,在机械臂上选择合适的激励点和测点,利用力锤锤击激励点后得到各点的激振力信号及相应的响应信号。利用模态分析软件拟合各测点的频响函数,并通过分析频响函数曲线来识别机械臂的固有频率。模态试验完成后,最终得到机械臂前 6 阶固有频率的试验值与用 Adams/Linear 模块求出的仿真值对比如表 2 所示。由表 2 可知,机械臂前六阶固有频率的仿真值与试验值之间的误差较小,证明前文建立的芒果采摘机械臂多体动力学仿真模型是合理可行的,从而为后续频率响应分析提供了可靠的仿真模型。

表 2 前 6 阶固有频率
Table 2 The first 6 natural frequencies

阶数 Orders	固有频率 Natural frequency/Hz		误差 Error rate/%
	试验值 Experimental value	仿真值 Simulation value	
1	1.65	1.61	-2.42
2	1.74	1.69	-2.88
3	1.98	2.04	3.03
4	2.16	2.08	-3.70
5	41.88	43.63	4.18
6	170.59	177.09	3.81

3.2 频率响应分析

为了得到与实际情况更接近的振动分析结果，将机械臂的多体动力学模型中旋转装置、摆动装置、伸缩装置转换为柔性体，在柔性体的连接处引入阻尼器，以模拟柔性体的内部耗散和阻尼效应，并与原有刚体部件之间施加约束。基于转换后的刚柔耦合模型，在机械臂底部创建振动元素，由于实际操作中可能遇到来自地面不均匀性、载荷变化或其他外部扰动因素引起的振动，故建立输入通道并施加沿竖直方向的正弦扫频信号激励，模拟实际操作中可能遇到的不同振动源，以研究底座振动对工作端部的影响。在末端执行器位置创建三方向的位移输出通道，调用 Vibration 模块进行仿真计算，通过计算输出位置的频响函数，得到输出响应结果曲线，如图 10 所示。从频响结果曲线可以看出，机械臂运行过程中，末端执行器 y 方向的振动最大，对整体振动结果的影响也最大；且在 0~10 Hz 之间，y 方向相对幅值变化平缓，因此调整系统结构使频率保持在该区间有利于机械臂的平稳运行。

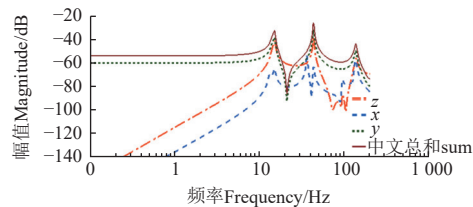
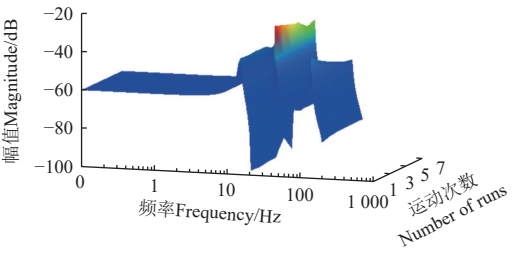


图 10 频响结果曲线
Fig.10 Frequency response result curve

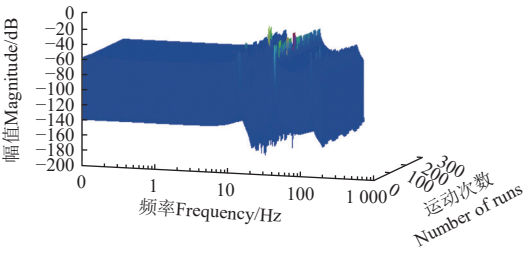
为了进一步对采摘机械臂进行振动分析，将模型柔性体连接处阻尼器参数化，其中阻尼器刚度系数、阻尼系数等都是用设计变量代替，以模拟柔性体的动态响应，定义末端执行器 y 方向为优化目标，并进行参数化计算，研究其对输出响应结果的影响。为了便于观察参数化计算下 y 方向响应结果的变化并降低计算的复杂性，首先在仅考虑平移刚度的情况下进行参数化计算，y 方向的三维频率响应幅值如图 11a 所示。结果显示在参数化计算下 y 方向幅值与图 10 频响结果差异较小，且不同参数下振动幅值最大值存在一定变化。

通过对平移和旋转刚度与阻尼参数化计算以研究 y 方向的振动影响，计算结果如图 11b 所示，在约第 100 次参数化计算时取得最大响应值为 0.166 5，此时振动幅值相较于其他仿真结果较小，表明该情况下机械臂系统的振动影响较低，运行平稳，无需再进行进一步优化或

调整。



a. 仅考虑平移刚度
a. Only considering the translation stiffness



b. 整体参数化条件下
b. Under overall parametric calculation

图 11 y 方向频率响应
Fig.11 The y-direction frequency response

4 结 论

根据海南地区芒果生长特点及采摘农艺，针对一种采收车机械臂几何构型与运动特性，采用 D-H 法建立了正运动学模型，在此基础上运用变量分离法对机械臂对应的关节变量进行逆运动学解耦计算，为末端执行器的位置、姿态提供求解依据，并运用笛卡尔空间运动规划方法对机械臂末端执行器进行了轨迹规划，有利于保证末端执行器运动的平稳性，从而确保采摘过程中芒果不掉落。采用拉格朗日法对该机械臂进行多体动力学建模与仿真求解，并考虑各自由度之间的运动耦合。在恒力矩工况下，伸缩装置和摆动装置的运动呈现一定的周期性，摆动装置、旋转装置角加速度和伸缩装置加速度均约在 1.25、2.3、4.15 s 达到阶段峰值；在仅做摆动周期运动时，旋转装置和摆动装置所受驱动力矩近似呈周期性变化，在一个周期内，峰值分别为 72.5 与 52 N·mm，均有两个极大值点。

[参 考 文 献]

[1] ZAHID G, AKA KACAR Y, SHIMIRA F, et al. Recent progress in omics and biotechnological approaches for improved mango cultivars in Pakistan[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2022, 69(6): 2047-2065.

[2] 胡伟, 张德生, 刘康德. 中国芒果产业发展变迁及影响因素研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2015, 36(6): 53-59.

HU Yi, ZHANG Desheng, LIU Kangde. Developing history and influence factors of the mango industry in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2015, 36(6): 53-59. (in Chinese with English abstract)

[3] 王菲, 朱叶红, 刘世豪. 自走式芒果采收车结构设计与分析[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2023, 41(4): 397-403.

WANG Fei, ZHU Yehong, LIU Shihao. Structural design and

- analysis of a self-propelled mango harvester[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2023, 41(4): 397-403. (in Chinese with English abstract)
- [4] 任晓智, 李福敏, 韦雨佳, 等. 智能芒果高空采摘车的有限元仿真设计与试验[J]. *农机化研究*, 2020, 42(12): 91-95. REN Xiaozhi, LI Fumin, WEI Yujia, et al. Finite element simulation design and test of intelligent mangohigh altitude picking vehicle[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(12): 91-95. (in Chinese with English abstract)
 - [5] 张锋斌, 刘世豪, 芮喜, 等. 芒果采收车的结构设计及有限元力学分析[J]. *食品工业*, 2019, 40(9): 225-229. ZHANG Fengbin, LIU Shihao, RUI Xi, et al. Structural design and finite element mechanical analysis of mango harvester[J]. *The Food Industry*, 2019, 40(9): 225-229. (in Chinese with English abstract)
 - [6] 张燕, 罗林辉, 廖宇兰, 等. 芒果采摘机的液压系统控制[J]. *液压与气动*, 2012(1): 51-54. ZHANG Yan, LUO Linhui, LIAO Yulan, et al. The hydraulic system of the mango picking machine[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2012(1): 51-54. (in Chinese with English abstract)
 - [7] 何浩, 张燕, 梁栋. 芒果采摘机构的设计[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(7): 4414-4415. HE Hao, ZHANG Yan, LIANG Dong. Design of mango picking machine[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(7): 4414-4415. (in Chinese with English abstract)
 - [8] 卢伟, 王鹏, 王玲, 等. 褐菇无损采摘柔性手爪设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(11): 28-36. LU Wei, WANG Peng, WANG Ling, et al. Design and experiment of flexible gripper for mushroom non-destructive picking[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11): 28-36. (in Chinese with English abstract)
 - [9] 周宇杰, 吴强, 贺磊盈, 等. 名优茶采摘机器人的系统设计与试验[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(19): 12-23. ZHOU Yujie, WU Qiang, HE Leiyong, et al. Design and experiment of intelligent picking robot for famous tea[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(19): 12-23. (in Chinese with English abstract)
 - [10] 李国利, 姬长英, 顾宝兴, 等. 多末端苹果采摘机器人机械手运动学分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 14-21. LI Guoli, JI Changying, GU Baoxing, et al. Kinematics analysis and experiment of apple harvesting robot manipulator with multiple end-effectors[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 14-21. (in Chinese with English abstract)
 - [11] 冯青春, 纪超, 张俊雄, 等. 黄瓜采摘机械臂结构优化与运动分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(S1): 244-248. FENG Qingchun, JI Chao, ZHANG Junxiong, et al. Optimization design and kinematic analysis of cucumber-harvesting-robotmanipulator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(S1): 244-248. (in Chinese with English abstract)
 - [12] YE Z, WANG Y, TANG Y, et al. Dynamic simulation analysis of the working process of the picking mechanism of a sugarcane leaf cutting and returning machine[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(3): 1620.
 - [13] KOURITEM S A, ABOUHEAF M I, NAHAS N, et al. A multi-objective optimization design of industrial robot arms[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(12): 12847-12867.
 - [14] NASRON N, GHAZALI N S, SHAHIDIN N M, et al. Soil suitability assessment for harumanis mango cultivation in UiTM Arau, Perlis[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 620(1): 012007.
 - [15] 谢若男, 马晨, 张群, 等. 海南省芒果主产区主栽品种果实品质特性分析[J]. *南方农业学报*, 2018, 49 (12): 2511-2517. XIE Ruonan, MA Chen, ZHANG Qun, et al. Characteristic analysis on fruit quality of major varieties in main mango producing regions of Hainan[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49 (12): 2511-2517. (in Chinese with English abstract)
 - [16] BORIBOONSUKSRI P, TAPTAGAPORN S, KAEWDOK T. Ergonomic task analysis for prioritization of work-related musculoskeletal disorders among mango-harvesting farmers[J]. *Safety*, 2022, 8(1): 6.
 - [17] AO J, XIANG Y, MING C, et al. Kinematics analysis and experiment of a lily picking mechanical arm[J]. *The Journal of Engineering*, 2018, 2018(16): 1674-1681.
 - [18] 马丛俊, 赵涛, 向国菲, 等. 基于逆运动学的柔性机械臂末端定位控制[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(13): 163-171. MA Congjun, ZHAO Tao, XIANG Guofei, et al. End positioning control of flexible manipulator based on inverse kinematics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(13): 163-171. (in Chinese with English abstract)
 - [19] PATEL S, NGUYEN V L, CAVERLY R J. Forward kinematics of a cable-driven parallel robot with pose estimation error covariance bounds[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 183: 105231.
 - [20] LI Z, JOSEF S. A technique for deriving equational conditions on the Denavit-Hartenberg parameters of 6R linkages that are necessary for movability[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 94: 1-8.
 - [21] MARAULI T, GATtringer H, MULLER A. Singularity robust inverse kinematics of serial manipulators by means of a joint arc length parameterization[C]//International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region. Cham: Springer International Publishing, 2022, 120: 19-27.
 - [22] 冷舒, 吴克, 居鹤华. 机械臂运动学建模及解算方法综述[J]. *宇航学报*, 2019, 40(11): 1262-1273. LENG Shu, WU Ke, JU Hehua. Overview of manipulator kinematics modeling and solving method[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(11): 1262-1273. (in Chinese with English abstract)
 - [23] 金丁灿, 蒋君侠, 来建良, 等. 后处理全齿轮传动机械臂的设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(5): 864-872. JIN Dingcan, JIANG Junxia, LAI Jianliang, et al. Design of gearing chain-based manipulator for post-processing[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering)*, 2022, 56(5): 864-872. (in Chinese with English abstract)
 - [24] JIN R, ROCCO P, GENG Y. Cartesian trajectory planning of space robots using a multi-objective optimization[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 108: 106360.
 - [25] DONG X, WANG Z, GUO S. State estimation and attack reconstruction of picking robot for a cyber-physical system[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022: 6240165.
 - [26] SOLTANI M, KESHMIRI M, MISRA A K. Dynamic analysis and trajectory tracking of a tethered space robot[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 128: 335-342.
 - [27] 王郝, 刘海瑞, 邹上元, 等. SCARA 机器人高斯过程动力

- 学建模研究[J]. *机械设计与制造*, 2019, 344(10): 235-237.
- WANG Hao, LIU Hairui, ZOU Shangyuan, et al. Research on dynamic modeling of SCARA robot with gaussian process regression[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019, 344(10): 235-237. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杜小强, 李党伟, 贺磊盈, 等. 基于电子果实技术的机械振动采收过程果实运动分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 58-64.
- DU Xiaoqiang, LI Dangwei, HE Leiyong, et al. Fruit motion analysis in process of mechanical vibration harvesting based on electronic fruit technique[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(17): 58-64. (in Chinese with English abstract)
- [29] YAN D, LUO L, ZHANG P, et al. Vibration analysis and experimental study of the effects of mechanised grape picking on the fruit-stem system[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 227: 82-94.
- [30] 罗坤, 吴正敏, 曹成茂, 等. 茶鲜叶嫩梢捏切组合式采摘器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 1-9.
- LUO Kun, WU Zhengmin, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of the combined pinch and cut picker for tea fresh leaf tips[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(13): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [31] 陈启优, 牛魁, 姚克恒, 等. 芒果采收车的结构动力学特性分析[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(7): 111-115.
- CHEN Qiyong, NIU Kui, YAO Keheng, et al. Structural analysis on mango harvesting vehicle[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(7): 111-115. (in Chinese with English abstract)
- [32] 庞靖, 林毅, 王升升, 等. 基于 VMD 的谷物清选筛振动分析与结构优化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(12): 1-9.
- PANG Jing, LIN Yi, WANG Shengsheng, et al. Vibration analysis and structure optimization of grain cleaning screen based on VMD[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(12): 1-9. (in Chinese with English abstract)

Analysis and test of the kinematics characteristics of the robotic arm for a mango harvesting vehicle

LIU Shihao¹, WANG Fei¹, LIN Mao¹, LIU Junxiao¹, YAO Keheng^{2*}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Motion characteristics of the robotic arm can dominate the performance of mango harvesting vehicles during picking. In this study, the kinematics analysis was carried out using the multi-body dynamics theory. An initiative was first undertaken to conceptualize and engineer a mango harvesting vehicle. The higher efficiency and labor-saving harvesting was achieved within tropical agricultural regions, compared with the manual. The equipment was designed with walking, lifting, and harvesting functions that were tailored to the Hainan mango planting environment, growth and harvesting agronomy. The core components of the vehicle included a hexapod bionic walking device, a robotic arm, and an end-effector. However, the harvested mangoes were of a modest size within the available operational range, resulting in a low load on the harvesting vehicle. The kinematics model of the robotic arm was established using the Denavit-Hartenberg (D-H), according to the growth of mangoes, the geometric and vector configuration of the robotic arm. The variable separation was employed to conduct the inverse kinematics on the joint variables of the robotic arm. The end-effector motion space planning was also conducted to systematically clarify the motion. The trajectory planning showed that the stability of end-effector motion fully met the motion requirements of the robotic arm during picking. The dynamic model of the robotic arm was constructed by the Lagrangian method. The forward and inverse dynamics simulation was carried out on the joint motion of the robotic arm under constant torque and only periodic swing using Adams software. The dynamic analysis showed that there was a certain periodicity movement under the constant torque in the telescopic and swing devices. The peak of the stage reached about 1.25, 2.3, and 4.15 s. In the case of only oscillating periodic motion, the driving torques of the rotating and oscillating device were approximately cyclically changed, with the peak values of 72.5, and 52 N·mm, respectively, indicating two maximum values in one motion cycle. A vibration analysis was also performed to determine the dynamic performance of the robotic arm. The feasibility of the multi-body dynamics model was verified using linear modal calculations and experiments. A vibration element was then created at the bottom of the robotic arm, in order to explore the effect of the bottom vibration excitation on the motion of the end-effector. The frequency response curve showed that the end-effector was subject to the greatest vibration in the y-direction during the operation of the robotic arm, leading to the overall vibration. Moreover, there was a relatively gentle amplitude in the y-direction between 0-10 Hz. Parametric calculations were then performed, where the y direction of the end-effector was defined as the target for optimization. The maximum response value of the robotic arm was 0.1665, indicating the minimal vibration to fully meet the specified smooth operation. In conclusion, the mango harvesting vehicle can be an effective solution to the challenges posed by manual mango picking in tropical agricultural areas. The trajectory planning shared the efficient and precise movement of the end-effector, meeting the requirements of mango harvesting. The multi-body dynamics model of the mango-picking robotic arm was verified by experiments. The findings can provide a strong reference for the picking performance of the robot arm for its high reliability and stability.

Keywords: agricultural machine; model; mango harvesting; picking; robotic arm; dynamic modeling; Kinematic characteristic