doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.003

击打式松果采摘机器人设计与试验

王克奇　张维昊　罗　泽　张怡卓
(东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 针对人工采摘松果过程中存在严重安全隐患的问题,设计了一种击打式松果采摘机器人,该机器人系统主要由电机驱动模块、主控模块、视觉模块、夹持模块、采摘模块组成,视觉模块完成松果识别与定位,实时反馈给主控模块,并控制电机驱动模块,配合夹持模块和采摘模块作业实现松果采摘。采用 Matlab 仿真软件建立松果采摘机器人运动学模型,求解出机械臂工作空间为直径 4.5 m 的球体;基于冲量原理和 Lagrange 方程建立碰撞动力学模型,通过动态分析求解出碰撞后各关节保持原有运动规律所需的驱动力矩;运用静力学原理建立关键组件有限元模型,利用 ANSYS Workbench 对结构进行优化设计,优化后其安全系数最低为 1.577 1,支撑关节最大变形 4.148 4 mm。仿真结果表明:该机器人结构在运动学、动力学及静力学方面均满足设计要求。制作物理样机并在实验室环境下进行了松果采摘试验,样机初始状态尺寸 1 000 mm×1 200 mm×1 100 mm,试验结果验证了机器人结构设计的合理性与实用性。

关键词: 松果采摘机器人; 击打式; 运动学分析; 动力学分析; 有限元分析
中图分类号: TP242.6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0026-08　　**OSID**:

Design and Experiment of Hitting Pine Cone Picking Robot

WANG Keqi　ZHANG Weihao　LUO Ze　ZHANG Yizhuo
(*School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Northeast Forestry University*, *Harbin* 150040, *China*)

Abstract: In order to settle the security issue in the process of artificial pine cone picking, a hitting pine cone picking robot was designed, which mainly included motor drive module, control module, vision module, clamping module and picking module. The system performed the pine cone identification and location through the vision module, transmitted the result back to the control module, and then controlled the motor drive module to cooperate with the clamping module and the picking module to complete the pine cone picking. Based on the kinematics model, the diameter of the working space of mechanical arm was calculated by Matlab software to be 4.5 m. A collision dynamics model based on Lagrange equation and pulse principle was used to solve the torque required to maintain the original law of motion during the collision. The optimized mechanical safety factor was at least 1.577 1 and the total deformation was 4.148 4 mm by the ANSYS Workbench software. Simulation results showed that the structure can satisfy the design requirements in terms of kinematics, dynamics and statics. The pine cone picking test was performed in the laboratory environment, and the size of the constructed prototype was 1 000 mm×1 200 mm×1 100 mm. The experimental results verified the rationality and practicability of the structure design of the robot, and its design and analysis provided guidance and theoretical basis for the development of the pine cone picking robot in the future.

Key words: pine cone picking robot; hitting; kinematic analysis; kinetics analysis; finite element analysis

0　引言

松果是一种成簇生长的林木球果,成熟后具有极高的营养价值和药用价值。松果采摘主要依赖人工,存在危险系数高、劳动强度大和采摘效率低等问题,不能满足行业发展需要,故实现松果机械化、自

收稿日期: 2019-11-20　修回日期: 2020-01-18
基金项目: 林业公益性行业科研专项(201504307)
作者简介: 王克奇(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事林业工程自动化研究,E-mail: zdhwkq@163.com
通信作者: 张怡卓(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事林业工程自动化研究,E-mail: nefuzyz@163.com

动化采摘具有重要意义。由于作业环境的非结构性和作业路径复杂等原因[1-3]，松果采摘机器人研究大多停留在实验室阶段。目前，簇生长果实机器人采摘主要采用吸附、抓取、剪断或折断等方式，可将其分为 2 类：第 1 类采用真空抽吸法使果实与果梗分离。如文献[4－5]研究了真空吸盘式果实采摘机器人，但松果表面不规则，不利于真空吸附。第 2 类通过夹持果实、切断或折断果梗使果实分离。如文献[6－8]提出旋拧方法实现猕猴桃和菠萝果实采摘，该方法采摘时易与相邻果实发生碰撞，且未讨论簇生猕猴桃的采摘问题。文献[9－11]对荔枝和番茄果梗切断特性进行研究，由于机械结构复杂，该方法不便深入植株内部采摘。松树高 15～20 m、冠幅 2～5 m，松果生长在松树树梢位置；松果果柄木质化程度高，果实分离力大；松果存在枝叶遮挡与重叠现象，这些都是研究松果采摘机器人的难题。

结合松果生长特征和针对现有采摘方式的不足，本文设计一种击打式松果采摘机器人。采用旋转击打的方式实现松果采摘，应用 Matlab 和 ADAMS 仿真对机械臂结构进行分析，探讨设计的合理性与实用性，应用 ANSYS Workbench 对结构进行优化设计，并求解结构安全系数与最大变形量，探讨设计的稳定性与有效性。

1　结构设计

1.1　总体结构设计

击打式松果采摘机器人由电机驱动模块、主控模块、视觉模块、夹持模块、采摘模块组成，其结构示意图如图 1 所示。

松果采摘机器人通过视觉模块进行松果识别与定位，实时反馈给主控模块，并通过电机驱动模块控制夹持模块和采摘模块，由采摘模块的击打臂杆对松果所在树枝进行击打，实现松果采摘。驱动模块均采用步进电机（57BYG250H/86BYG250D 型）进行闭环控制调节。设计松果采摘机器人过程中在满足强度和刚度要求的基础上，应满足最小质量要求，降低采摘工作的能量损耗。故松果采摘机器人的工作方式设计为：支撑臂伸长至升降臂杆与底座垂直

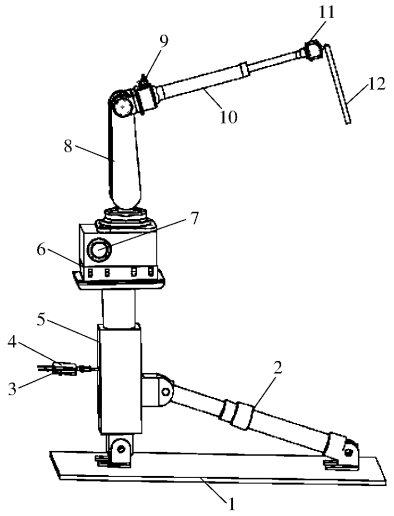


图 1　击打式松果采摘机器人结构简图

Fig. 1　Structure diagram of hitting pine cone picking robot

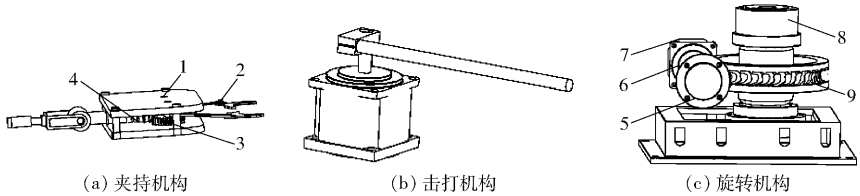
1. 底座　2. 支撑臂　3. 夹持机构　4. 传感器　5. 升降臂杆　6. 旋转机构　7. 驱动模块　8. 攀爬机械臂　9. 视觉模块　10. 采摘机械臂　11. 步进电机　12. 击打臂杆

位置，采摘机器人由初始状态转换为工作状态，夹持机构完成对松树主干的夹持，升降臂杆通过视觉模块捕捉松果高度信息进行升降，旋转机构和采摘机械臂根据松果位置信息进行调整，击打臂杆完成对松果所在目标树枝的击打。根据工作环境和实际要求，采摘机器人的夹持机构和击打臂杆在工作过程中会损伤树木的表面细胞组织，所以在与树干和树枝接触的位置采用软质橡胶进行包裹，以减小对树木表面组织的伤害。

1.2　关键组件设计

夹持模块由视觉传感器、夹持机械臂、夹持机械手以及连接件组成，如图 2a 所示。夹持机构在采摘工作中任务为夹持松树主干以保证采摘机器人在工作过程中的稳定性，起到夹持和平衡力矩的双重作用。考虑到夹持过程中应避免夹持机械手与枝条共面而导致夹持失败的情况，设计二自由度夹持机构，通过图像识别与处理保证夹持机构稳定夹持。

采摘模块由旋转机构、击打机构、视觉模块、传感器以及连接件组成。采摘模块通过涡轮蜗杆、齿轮传动和电机传动实现不同方向、小范围不同高度



(a) 夹持机构　(b) 击打机构　(c) 旋转机构

图 2　关键组件结构简图

Fig. 2　Structural diagrams of important component

1. 夹持机械臂　2. 夹持机械手　3. 齿轮　4. 齿条　5. 轴承盖　6. 蜗杆　7. 步进电机　8. 涡轮轴　9. 涡轮

和不同距离松果的采摘。旋转机构采用涡轮蜗杆的传动方式可有效提高传动比,减小结构质量,其设计参数为模数 5,减速比 30,击打机构和旋转机构如图 2b、2c 所示;利用视觉传感器和激光范围传感器对松果进行双重识别与定位,实现采摘。

2 运动学仿真与分析

机器人运动学分析主要是末端执行器的位姿与机械臂关节变量之间的关系。采用 D-H 参数法建立击打式松果采摘机器人运动学方程,其连杆坐标系如图 3 所示,坐标系 $\{O\}$ 为基坐标系。

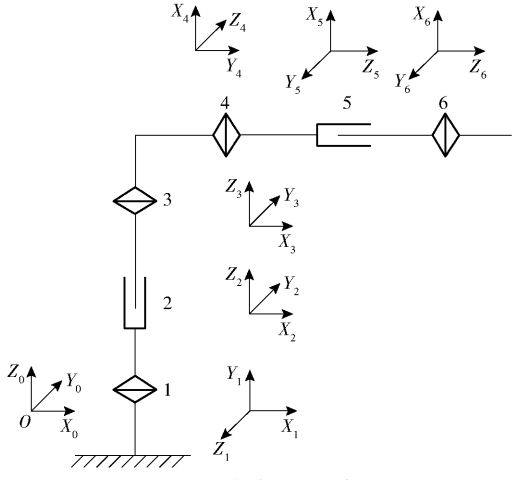


图 3 机械臂连杆坐标系

Fig. 3 Link coordinate system of manipulator

2.1 正运动学求解

根据各连杆参数以及所建立坐标系的关系可得各关节的 D-H 参数,如表 1 所示。表中 θ_1、d_2、θ_3、θ_4、d_5 和 θ_6 为关节变量,α_i、a_i、d_i、θ_i 分别为连杆扭转角、连杆长度、连杆偏移量、关节角。

表 1 D-H 参数

Tab. 1 Parameters of D-H

关节	α_i/(°)	a_i/mm	d_i	θ_i	关节变量范围
1	90	0	0	θ_1	-90°~30°
2	-90	0	d_2	0	315~2 400 mm
3	0	0	0	θ_3	-180°~180°
4	-90	200	0	θ_4	-90°~90°
5	-90	0	d_5	0	240~2 000 mm
6	0	0	0	θ_6	-180°~180°

关节 $i(i=2,6)$ 为移动关节变换矩阵

$$ {}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T}=\mathrm{Trans}(a_i,0,0)\times\mathrm{Rot}(x,\alpha_i)\times \mathrm{Rot}(z,\theta_i)\times\mathrm{Trans}(0,0,d_i) \tag{1}$$

关节 $i(i=1,3,4,5)$ 为旋转关节变换矩阵

$$ {}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T}=\mathrm{Trans}(a_i,0,0)\times\mathrm{Trans}(0,0,d_i)\times \mathrm{Rot}(x,\alpha_i)\times\mathrm{Rot}(z,\theta_i) \tag{2}$$

式中 Trans( )——坐标系绕轴平移函数

Rot( )——坐标系绕轴旋转函数

设正运动学方程为 ${}^0_6\boldsymbol{T}$,将表 1 的参数代入相应的变换矩阵,得

$$ {}^0_6\boldsymbol{T}={}^0_1\boldsymbol{T}{}^1_2\boldsymbol{T}{}^2_3\boldsymbol{T}{}^3_4\boldsymbol{T}{}^4_5\boldsymbol{T}{}^5_6\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x\\ n_y & o_y & a_y & p_y\\ n_z & o_z & a_z & p_z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{T}$ 为相应变换矩阵,${}^0_6\boldsymbol{T}$ 为总的变换矩阵。${}^0_1\boldsymbol{T}$、${}^1_2\boldsymbol{T}$、${}^2_3\boldsymbol{T}$、${}^3_4\boldsymbol{T}$、${}^4_5\boldsymbol{T}$、${}^5_6\boldsymbol{T}$ 为每个关节的变换矩阵,通过前面移动关节(式(1))和旋转关节(式(2))的变换矩阵最终推导出总的变换矩阵 ${}^0_6\boldsymbol{T}$。

为简化书写,令 $\cos\theta_i=C_i$,$\sin\theta_i=S_i$,$\cos\theta_i\cos\theta_j=C_{ij}$,$\sin\theta_i\sin\theta_j=S_{ij}$,$\cos\theta_i\cos\theta_j\cos\theta_k=C_{ijk}$,$\sin\theta_i\sin\theta_j\sin\theta_k=S_{ijk}$。

位置向量 $\boldsymbol{p}$ 为

$$ \begin{cases} p_x=200C_{13}-d_2S_1+d_5S_{14}+d_5C_{134}\\ p_y=200S_3+d_5C_4S_3\\ p_z=C_1d_2+200C_3S_1+d_5C_{34}S_1-d_5C_1S_4\end{cases} \tag{4}$$

姿态矩阵为

$$ [\boldsymbol{n}\quad\boldsymbol{o}\quad\boldsymbol{a}]=\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x\\ n_y & o_y & a_y\\ n_z & o_z & a_z\end{bmatrix} \tag{5}$$

其中

$$ \begin{bmatrix} n_x\\ n_y\\ n_z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} C_1S_{36}-C_{46}S_1+C_{136}S_4\\ C_6S_{34}-C_3S_6\\ C_{146}+C_{36}S_{14}+S_{136}\end{bmatrix}$$

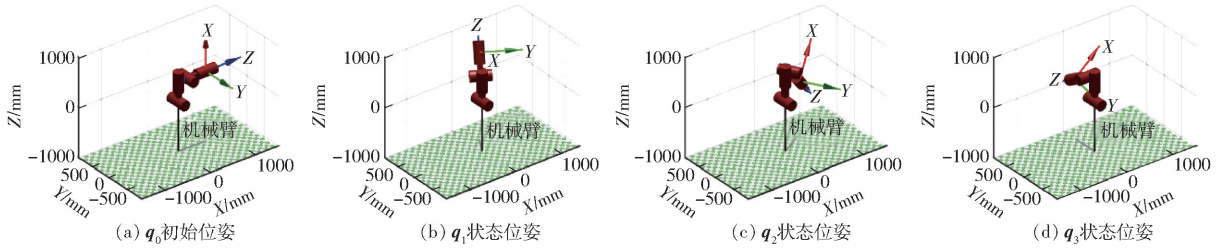
$$ \begin{bmatrix} o_x\\ o_y\\ o_z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} S_{16}C_4-C_{13}S_{46}+C_{16}S_3\\ -C_{36}-S_{346}\\ C_6S_{13}-C_{14}S_6-C_3S_{146}\end{bmatrix}$$

$$ \begin{bmatrix} a_x\\ a_y\\ a_z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} S_{14}+C_{134}\\ C_4S_3\\ C_{34}S_1-C_1S_4\end{bmatrix}$$

2.2 正运动学仿真与验证

基于 Matlab 平台 Robotics Toolbox 中改进型 D-H 参数法,根据表 1 数据设初始位置的机械臂姿态 $\boldsymbol{q}_0=(0°,400\ \mathrm{mm},0°,0°,400\ \mathrm{mm},0°)$,机械臂坐标轴为松果采摘机器人末端执行器位姿,则建立的机械臂模型如图 4a 所示。

在机械臂各关节变量运动范围内,输入 3 组关节变量 $\boldsymbol{q}_1=(0°,400\ \mathrm{mm},60°,-60°,400\ \mathrm{mm},0°)$,$\boldsymbol{q}_2=(0°,500\ \mathrm{mm},30°,45°,600\ \mathrm{mm},0°)$,$\boldsymbol{q}_3=(0°,400\ \mathrm{mm},90°,30°,400\ \mathrm{mm},60°)$,可得到机械臂位姿如图 4b、4c、4d 所示。为验证推导的正运动学方程的正确性和搭建模型的合理性,将关节变量 $\boldsymbol{q}_1$、$\boldsymbol{q}_2$、$\boldsymbol{q}_3$ 分别代入式(3)。结果对比如表 2 所示。



(a) q_0初始位姿　(b) q_1状态位姿　(c) q_2状态位姿　(d) q_3状态位姿

图 4　机械臂位姿

Fig. 4　Position of manipulator

表 2　结果对比

Tab. 2　Comparison of results

正运动学方程计算结果	Matlab 仿真结果
$\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix}-0.433\,0 & 0.866\,0 & 0.250\,0 & 200.000\,0\\ -0.750\,0 & -0.500\,0 & 0.433\,0 & 346.410\,2\\ 0.500\,0 & 0 & 0.866\,0 & 746.410\,2\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$	$\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix}-0.433\,0 & 0.866\,0 & 0.250\,0 & 200.0\\ -0.750\,0 & -0.500\,0 & 0.433\,0 & 346.4\\ 0.500\,0 & 0 & 0.866\,0 & 746.4\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$
$\boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}0.612\,4 & 0.500\,0 & 0.612\,4 & 540.628\,5\\ 0.353\,6 & -0.866\,0 & 0.353\,6 & 312.132\,0\\ 0.707\,1 & 0 & -0.707\,1 & 75.735\,9\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$	$\boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}0.612\,4 & 0.500\,0 & 0.612\,4 & 540.6\\ 0.353\,6 & -0.866\,0 & 0.353\,6 & 312.1\\ 0.707\,1 & 0 & -0.707\,1 & 75.7\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$
$\boldsymbol{T}_3=\begin{bmatrix}0.866\,0 & 0.500\,0 & 0 & 0\\ 0.250\,0 & -0.433\,0 & 0.866\,0 & 546.410\,2\\ 0.433\,0 & -0.755\,0 & -0.500\,0 & 200.000\,0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$	$\boldsymbol{T}_3=\begin{bmatrix}0.866\,0 & 0.500\,0 & 0 & 0\\ 0.250\,0 & -0.433\,0 & 0.866\,0 & 546.4\\ 0.433\,0 & -0.755\,0 & -0.500\,0 & 200.0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$

对比 Matlab 仿真结果和理论计算结果可知：输入相同的关节变量，输出的位姿是一致的，验证了正运动学模型及运动学方程的正确性。

2.3　逆运动学求解

运动学逆解用于机械臂末端执行器的精确定位和运动规划，其本质是将末端执行器的空间矢量信息转换为可供驱动电机识别的参数信息。逆运动学分析为已知机械臂末端执行器的位姿来求解各关节的关节变量，逆运动学的方法可以分为解析法、几何法和迭代法[12-14]。试验采用矩阵逆乘解析法求解运动学逆解

$$ {}^1_2\boldsymbol{T}{}^2_3\boldsymbol{T}{}^3_4\boldsymbol{T}={}^0_1\boldsymbol{T}^{-1}{}^1_6\boldsymbol{T}{}^6_5\boldsymbol{T}^{-1}{}^5_4\boldsymbol{T}^{-1} \tag{6}$$

其中

$$ {}^1_2\boldsymbol{T}{}^2_3\boldsymbol{T}{}^3_4\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}C_3S_4 & C_3C_4 & -S_3 & a_1C_3\\ C_4 & -S_4 & 0 & d_2\\ -S_3S_4 & -C_4S_3 & -C_3 & -a_1S_3\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$ {}^0_1\boldsymbol{T}^{-1}{}^1_6\boldsymbol{T}{}^6_5\boldsymbol{T}^{-1}{}^5_4\boldsymbol{T}^{-1}= $$

$$ \begin{bmatrix}C_6C_1n_x+C_6S_1n_z-S_6C_1o_x-S_1S_6o_z & a_xC_1+a_zS_1 & -C_1C_6o_x-C_6S_1o_z-S_6C_1n_x-S_1S_6n_z & C_1p_x+S_1p_z-d_5a_xC_1-d_5a_zS_1\\ C_6C_1n_z-C_6S_1n_x-S_6C_1o_z+S_1S_6o_x & a_zC_1-a_xS_1 & -C_1C_6o_z+C_6S_1o_x-S_6C_1n_z+S_1S_6n_x & C_1p_z-S_1p_x-d_5a_zC_1+d_5a_xS_1\\ S_6o_y-C_6n_y & -a_y & C_6o_y+n_yS_6 & a_yd_5-p_y\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} $$

记$(i,j)_L$为式(6)左边矩阵第 i 行第 j 列元素，$(i,j)_R$为式(6)右边矩阵第 i 行第 j 列元素。根据式(6)，$(3,4)_L=(3,4)_R$、$(3,3)_L=(3,3)_R$，可得

$$ \begin{cases}a_yd_5-p_y=-a_1S_3\\ C_6o_y+n_yS_6=-C_3\end{cases} \tag{7}$$

由式(7)可得

$$ \begin{cases}\theta_3=\pm\arcsin\dfrac{p_y-a_yd_5}{a_1} & (a_1\neq0)\\ \theta_6=A\tan2(-C_3,\pm A)-A\tan2(o_y,n_y) & (A\geqslant0)\end{cases} $$

其中

$$ A=\sqrt{o_y^2+n_y^2-C_3^2} \tag{8}$$

根据式(6)，$(2,3)_L=(2,3)_R$，可得

$$ -C_1C_6o_z+C_6S_1o_x-S_6C_1n_z+S_1S_6n_x=0 \tag{9}$$

化简式(9)可得

$$ C_1(C_6o_z+S_6n_z)-S_1(C_6o_x+S_6n_x)=0 \tag{10}$$

令

$$ m=C_6o_z+S_6n_z \quad n=C_6o_x+S_6n_x $$

则式(10)可改写为

$$ mC_1-nS_1=0 \tag{11}$$

由式(11)可得

$$ \theta_1=A\tan2(m,n)-A\tan2(0,\sqrt{m^2+n^2}) \tag{12}$$

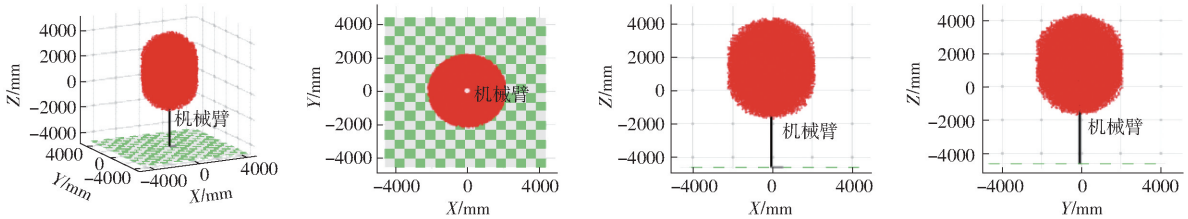
根据式(6),$(1,4)_L=(1,4)_R$、$(2,4)_L=(2,4)_R$、$(2,1)_L=(2,1)_R$,可得

$$\begin{cases} C_1p_x+S_1p_z-d_5a_xC_1-d_5a_zS_1=a_1C_3 \\ C_1p_z-S_1p_x-d_5a_zC_1+d_5a_xS_1=d_2 \\ C_6C_1n_z-C_6S_1n_x-S_6C_1o_z+S_1S_6o_x=C_4 \end{cases} \tag{13}$$

由式(13)可得

$$\begin{cases} d_5=\dfrac{C_1p_x+S_1p_z-a_1C_3}{a_zS_1} \quad (a_zS_1\neq 0) \\ d_2=C_1p_z-S_1p_x-d_5a_zC_1+d_5a_xS_1 \\ \theta_4=\pm\arccos B \end{cases}$$

其中 $$B=C_6C_1n_z-C_6S_1n_x-S_6C_1o_z+S_1S_6o_x \tag{14}$$



(a) 机械臂工作空间 (b) *XOY*平面投影 (c) *XOZ*平面投影 (d) *YOZ*平面投影

图 5 机械臂工作空间

Fig. 5 Workspace of manipulator

比分析可知,理论求解空间满足实际采摘要求。

3 动力学分析与采摘试验

3.1 动力学分析

机器人动力学是研究物体运动与作用力之间的关系,针对松果采摘机器人在目标捕捉和采摘过程的碰撞问题,采用第一类拉格朗日法[17-18]和冲量原理[19-21]建立机械臂的动力学方程和碰撞动力学模型。拉格朗日公式是一种基于能量的动力学方法,对于任何机械系统,拉格朗日方程为

$$L=E_k-E_p \tag{15}$$

式中 L——拉格朗日函数

E_k——系统总动能,J

E_p——系统总势能,J

系统动力学带拉格朗日乘子的拉格朗日方程的能量形式为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_j}\right)-\frac{\partial E_k}{\partial q_j}=Q_j+\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\frac{\partial \phi}{\partial q_j} \tag{16}$$

式中 q_j——广义坐标,描述系统位形所需要的独立参数

Q_j——广义力 $\dot{q}_j$——广义速度

λ_i——拉格朗日乘子

在 ADAMS 中建立虚拟样机模型,通过动态分析确定机器人的结构、响应时间等参数,完成对机器人动力学性能的评估。

动力学仿真模型如图 6 所示,碰撞发生瞬时各关节产生刚性冲击,碰撞后各机械臂运动状态和力学性能均发生变化,对机械臂运行过程中碰撞问题进行研究可为机械臂轨迹规划和实时控制提供理论依据。

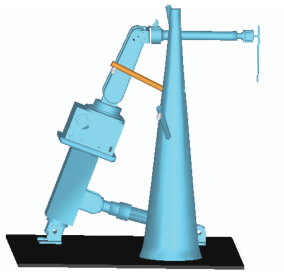


图 6 动力学仿真模型

Fig. 6 Model of dynamics simulation

3.2 动力学仿真分析

ADAMS 中设置仿真时间 8 s,仿真步长 500 步,仿真方式为脚本仿真,重力加速度方向沿 X 轴正方向。根据经典碰撞理论[22],假定系统碰撞接触时间无限小,碰撞是点接触,碰撞过程中杆的形状和惯量不变。设定松果采摘机器人击打臂杆在 6.3 s 第 1 次击打松果所在树枝,击打臂杆输入转矩 3.6 N·m,输入转速 500 r/min。试验结果如图 7、8 所示。

由图 7 可知,树枝在 0 ~ 1 s 内由于受到重力作用位移和力曲线均产生小范围波动;在 6.3 ~ 8 s 内受到机械臂多次击打产生位移和力的改变。通过受力分析可得到使松果掉落最小力矩。

由图 8 可知,机械臂受到冲击时导致系统速度突变,6.3 ~ 8 s 机械臂与树枝产生 3 次碰撞,其碰撞

2.4 工作空间分析

工作空间是指机器人在采摘过程中,末端执行器所能达到空间点的集合,机械臂的工作空间是评价其完成任务能力的一个重要运动学指标。试验采用蒙特卡洛法[15-16]计算松果采摘机器人的工作空间。结合表 1 数据得到机械臂工作空间及 *XOY*、*XOZ*、*YOZ* 平面投影如图 5 所示。

由图 5 可知,机械臂工作空间连续、工作点分布密集,其形状可近似为直径 4.5 m 的球体,由于松果生长于松树树梢位置,其工作空间中心空洞为连接两关节连杆造成,采摘机器人位于松树 0.5 m 处,对

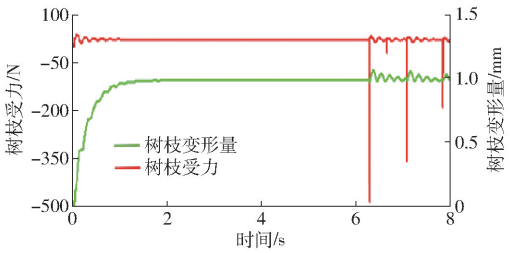


图 7　树枝受力与位移曲线

Fig. 7　Curves of branch force and displacement

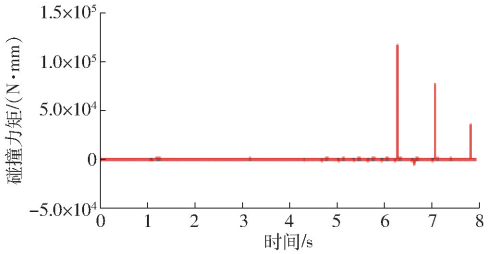


图 8　碰撞力矩曲线

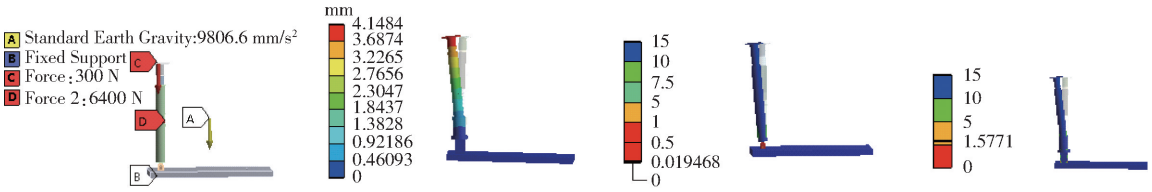
Fig. 8　Curve of collision torque

发生瞬间各关节产生刚性冲击，t = 6.3 s 时产生第 1 次碰撞，其峰值转矩为 1.2 × 10^5 N·mm。若为保证机械臂碰撞后保持原有运动规律，需对各关节驱动力矩进行控制调节。

3.3　支撑关节静力学分析

支撑关节如图 1 所示，由支撑铰链和升降臂杆组成。松果采摘机器人的支撑关节在工作过程中不仅承受整个系统的重力和力矩，而且承受采摘过程中的交变载荷，是整个系统受力最为集中的关节，故对其进行静力学分析。由动力学仿真可知，支撑关节在 6.3 s 时受力最大，峰值 6 400 N，利用 ANSYS Workbench 软件建立有限元分析模型，材料选择铝合金，如图 9a 所示。结构静力学用于计算在固定不变载荷作用下结构的效应，它不考虑惯性和阻尼的影响，静力分析方程为

$$\boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{F} \tag{17}$$



(a) 有限元模型　(b) 总变形量　(c) 安全系数(铝合金)　(d) 安全系数(镁合金)

图 9　有限元分析

Fig. 9　Finite element analysis

式中　$\boldsymbol{K}$——刚度矩阵

$\boldsymbol{x}$——位移矢量

$\boldsymbol{F}$——静态加载节点力

极限载荷情况下，支撑关节最大变形量为 4.148 4 mm，满足设计要求。

由于合金材料为塑性材料，故采用形状改变比能理论[23-25]对支撑关节进行安全系数分析。当材料的最大等效应力 σ_e 大于材料的限制应力 S_{limit} 时，材料就会发生屈服破坏。安全系数 $F_s = \dfrac{S_{\text{limit}}}{\sigma_e}$，$\sigma_e \geqslant S_{\text{limit}}$，系数大于等于 1，表示结构安全。

由图 9c 可知，应力集中区域出现在铰点处，安全系数最低为 0.019 468，此处采用铝合金材料不能满足工作需要。故采用力学性能更好的镁合金作为支撑铰链材料，并采用双铰链和增加臂杆底座的方式对其进行加固，其仿真图像如图 9d 所示。其安全系数最低为 1.577 1，可满足采摘需求。

3.4　松果采摘试验

基于仿真结果，通过调整机械臂的尺寸参数、安装位置对结构进行优化，并搭建击打式松果采摘机器人样机，在实验室环境下进行松果采摘试验。仿真松树树高 4 m，冠幅 3 m，松果采摘机器人初始状态尺寸 1 000 mm × 1 200 mm × 1 100 mm，质量 45 kg，击打臂杆输入转速 500 r/min。采摘试验如图 10 所示。姿态传感器(JY901 型)实时监测机械臂运动位姿，并与理论位姿进行对比，利用控制系统负反馈调节可确保机械臂运动至指定位置。



图 10　采摘试验

Fig. 10　Picking test

试验表明:采摘时间 22 min/棵,机械臂工作过程中角加速度曲线如图 11 所示。由图 11 可知,机械臂 0 ~ 13 s 运行平稳,各轴小范围波动是由于各机械臂运动所产生的耦合运动,击打臂杆 13 s 和 35 s 时分别击打松果所在树枝,导致角加速度发生突变,击打后机械臂恢复平稳运行状态,验证了机械臂具有较好的动态响应,其实际工作空间与理论分析基本一致。

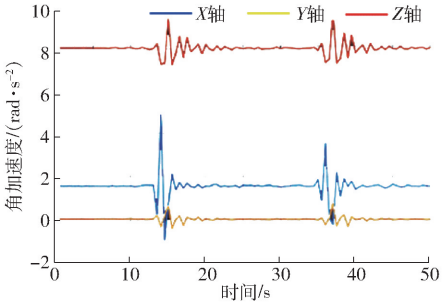


图 11 角加速度曲线

Fig. 11 Angular acceleration curves

3.5 实用化分析

松树树高 15 ~ 20 m,冠幅 2 ~ 5 m,实际工作过程中各臂杆运动将产生较大惯性力矩和耦合运动,通过降低机械结构垂直方向的重心确保采摘过程运行平稳;由于击打臂杆在碰撞过程中产生较大扭转力矩,通过增加夹持机构和振动控制技术减小碰撞后机械结构的速度突变和抖动情况;林间树木间隔狭小、地势凹凸不平,通过视觉模块和激光范围传感器实现松果的准确识别和定位,采用高冗余自由度机械臂提高松果采摘机器人的避障能力。

人工红松林松果采摘过程中,将击打式松果采摘机器人安装于全地形履带车(SJ2000 型,浙江省胜德电器有限公司),用以适应复杂的林间环境,履带车由柴油机提供动力,采用远程操控的方式进行林间行走,行驶至目标树下,采摘机器人通过视觉模块进行松果识别与定位,机械臂通过主控模块自适应调整实现松果采摘。

4 结论

(1)设计了一种击打式松果采摘机器人,可实现在复杂林间环境下的精准采摘。其结构设计紧凑,可完成松果识别、定位和采摘等一系列工序。

(2)建立了采摘机器人运动学方程,基于 Matlab Robotics Toolbox 得出机械臂运动位姿,采用蒙特卡洛法求解出机械臂工作空间为直径 4.5 m 球体;基于 ADAMS 建立了碰撞动力学模型,分析得出采摘机器人最小击打力矩和碰撞后保持原有运动规律所需的驱动力矩,验证了结构设计的合理性与实用性。

(3)进行有限元分析,并搭建物理样机模型,运用 ANSYS Workbench 对受力集中组件进行安全系数和总变形分析,并对应力集中构件进行优化设计。结果表明:该机器人安全系数最低为 1.577 1,支撑关节最大变形 4.148 4 mm,应力分布合理;在实验室环境下进行了采摘试验,结果表明,其采摘空间、采摘过程树木受力情况与理论分析基本一致,验证了结构设计的稳定性与有效性。

参 考 文 献

[1] ZHAO Y, GONG L, HUANG Y, et al. A review of key techniques of vision-based control for harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127:311 - 323.

[2] BECHARA, VIGNEAUIT J. Agricultural robots for field operations: concepts and components[J]. Biosystems Engineering, 2016, 149:94 - 111.

[3] XIONG Y, GE Y, GRIMSTAD L, et al. An autonomous strawberry-harvesting robot: design, development, integration, and field evaluation[J]. Journal of Field Robotics, 2019, 121:52 - 69.

[4] NGUYEN T, KAYACAN E, BAEDEMAEKER J D, et al. Task and motion planning for apple harvesting robot[J]. Ifac Proceedings Volumes, 2013, 46(18):247 - 252.

[5] 刘继展,李萍萍,李智国,等. 面向机器人采摘的番茄力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12):66 - 70.
LIU Jizhan, LI Pingping, LI Zhiguo, et al. Experimental study on mechanical properties of tomato for robot picking[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 66 - 70. (in Chinese)

[6] 陈军,王虎,蒋浩然,等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10):151 - 154.
CHEN Jun, WANG Hu, JIANG Haoran, et al. Design of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 151 - 154. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20121027&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.027. (in Chinese)

[7] 傅隆生,张发年,槐岛芳德,等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3):1 - 8.
FU Longsheng, ZHANG Fanian, GEJIMA Y, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 1 - 8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150301&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.001. (in Chinese)

[8] 姜涛,郭安福,程学斌,等. 菠萝自动采摘收集机结构设计与分析[J]. 工程设计学报, 2019,24(10):60 - 66.
JIANG Tao, GUO Anfu, CHENG Xuebin, et al. Structural design and analysis of pineapple automatic picking and collecting machine [J]. Journal of Engineering Design, 2019, 24(10): 60 - 66. (in Chinese)

[9] 陈燕,蒋志林,李嘉威,等. 夹剪一体的荔枝采摘末端执行器设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):35 - 41.
CHEN Yan, JIANG Zhilin, LI Jiawei, et al. Design and testing of litchi picking end-effector integrated clamping and cutting performance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(1):35 - 41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180104&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.004. (in Chinese)

[10] 路杰,梁喜凤. 番茄果实串采摘执行器设计与运动仿真[J]. 农机化研究,2020,45(7):88 - 93.
LU Jie, LIANG Xifeng. Design and motion simulation of tomato fruit string picking actuator [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,45(7):88 - 93. (in Chinese)

[11] 林用满,管卫华,甘莉莉. 六自由度水果采摘机械臂结构设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2019,40(2):62 - 71.
LIN Yongman, GUAN Weihua, GAN Lili. Structural design and experiment of a six-degree-of-freedom fruit picking robotic arm [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(2): 62 - 71. (in Chinese)

[12] 王其军,杜建军. MOTOMAN 机器人逆运动学新分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(3):451 - 454.
WANG Qijun, DU Jianjun. New analysis of inverse kinematics of MOTOMAN robot [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2010,42(3):451 - 454. (in Chinese)

[13] 赵京,龚世秋,张自强. 7 自由度拟人臂仿人运动的逆运动学解析解[J]. 机械工程学报, 2018,54(21):39 - 46.
ZHAO Jing, GONG Shiqiu, ZHANG Ziqiang. Inverse kinematics analytical solution of humanoid motion of anthropomorphic arm with 7 degrees of freedom[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 39 - 46. (in Chinese)

[14] 王海峰,尹彬,罗锐捷,等. 四自由度 SCARA 机器人系统机构设计及运动学分析[J]. 机电工程, 2019,25(1):10 - 17.
WANG Haifeng, YIN Bin, LUO Ruijie, et al. Mechanism design and kinematics analysis of a four-degree-of-freedom SCARA robot system [J]. Electromechanical Engineering, 2019, 25(1): 10 - 17. (in Chinese)

[15] 刘志忠,柳洪义,罗忠,等. 机器人工作空间求解的蒙特卡罗法改进[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(1):230 - 235.
LIU Zhizhong, LIU Hongyi, LUO Zhong, et al. Improvement of Monte Carlo method for robot workspace determination[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 230 - 235. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130143&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.043. (in Chinese)

[16] 徐振邦,赵智远,贺帅,等. 机器人工作空间求解的蒙特卡洛法改进和体积求取[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11):94 - 104.
XU Zhenbang, ZHAO Zhiyuan, HE Shuai, et al. Monte Carlo method improvement and volumetric solution for solving robot workspace[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(11): 94 - 104. (in Chinese)

[17] 张铁,覃彬彬,邹焱飚. 机器人负载的动力学参数辨识[J]. 工程科学学报, 2017(12):1907 - 1912.
ZHANG Tie, QIN Binbin, ZOU Yanbiao. Identification of dynamic parameters of robot loads[J]. Journal of Engineering Science, 2017(12): 1907 - 1912. (in Chinese)

[18] 王晓磊,金振林,李晓丹,等. 串并混联四足仿生机器人动力学建模与分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):401 - 412.
WANG Xiaolei, JIN Zhenlin, LI Xiaodan, et al. Dynamic modeling and analysis of serial-parallel hybrid quadruped bionic robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):401 - 412. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190446&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.046. (in Chinese)

[19] 金国光,武光涛,畅博彦,等. 机械臂接触碰撞动力学分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(11):369 - 375.
JIN Guoguang, WU Guangtao, CHANG Boyan, et al. Dynamic analysis of manipulator with contact impact [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(11):369 - 375. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20161150&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.050. (in Chinese)

[20] 郭嘉楠,何鹏,刘占生,等. 粗糙接触面旋转铰间隙碰撞动力学建模与仿真[J]. 振动与冲击,2019,38(11):132 - 139.
GUO Jia'nan, HE Peng, LIU Zhansheng, et al. Modeling and simulation of gap collision dynamics of rotating joints with rough contact surfaces[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(11): 132 - 139. (in Chinese)

[21] 郑明亮, 冯鲜, 李文霞,等. 机械多体系统碰撞动力学的对称性和守恒量研究[J]. 应用数学和力学, 2018,30(15):95 - 101.
ZHENG Mingliang, FENG Xian, LI Wenxia, et al. Research on symmetry and conserved quantities of collision dynamics of mechanical multibody systems [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2018,30(15): 95 - 101. (in Chinese)

[22] 陈峰华. ADAMS 2012 虚拟样机技术从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

[23] 徐建飞,范纪华,任亮,等. 基于 ADAMS 和 ANSYS 工业机器人运动仿真与有限元分析[J]. 机床与液压,2018,46(18):31 - 34.
XU Jianfei, FAN Jihua, REN Liang, et al. Motion simulation and finite element analysis of industrial robot based on ADAMS and ANSYS[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(18):31 - 34. (in Chinese)

[24] 余俊炜,许洪斌,徐涛金,等. 一种绳牵引上肢康复机器人结构设计与有限元分析[J]. 机械传动,2018,42(12):99 - 103.
YU Junwei, XU Hongbin, XU Taojin, et al. Structural design and finite element analysis of a rope-drawn upper limb rehabilitation robot [J]. Mechanical Transmission, 2018, 42(12): 99 - 103. (in Chinese)

[25] 浦广益. ANSYS Workbench 基础教程与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.