

# 阻抗模型下的采摘机器人末端柔顺 抓取力控制方法研究

耿昕龙, 张 旭

(西安核设备有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 果蔬采摘是一项复杂且耗时的任务, 需要处理各种动态、不规则的果蔬形状和位置, 同时保证果蔬的完整性和新鲜度。因为常规采摘控制方法效率低下, 而且容易造成果实损伤, 为此, 提出一种阻抗模型下的采摘机器人末端柔顺抓取力控制方法。以采摘机器人末端柔顺抓取稳定性为约束条件, 根据运动学原理分析手指末端电机的电磁转矩与转速间的关系, 利用毕奥 - 萨伐尔定律获取抓取力控制信号。基于阻抗模型、二阶系统设计抓取力控制器, 通过二阶低通滤波器调节电机运转, 得出机器人抓取的期望位置、速度及加速度, 完成抓取力控制任务。实验结果表明, 阻抗模型可应用于各种果蔬采摘场景, 且末端柔顺抓取力控制误差小, 稳定性高, 解决果蔬采摘存在的难题, 推动农业生产的现代化和智能化。

**关键词:** 阻抗模型; 采摘机器人; 抓取力; 电机转矩; 电机转速; 位置控制器

中图分类号: TP242

文章编号: 1000 - 0682(2024)04 - 0052 - 05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.011

## Research on the control method of the flexible grasping force of the end of a picking robot under the impedance model

GENG Xinlong, ZHANG Xu

(Xi'an Nuclear Equipment Co., Ltd., Shaanxi Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Picking fruits and vegetables is a complex and time-consuming task that requires handling various dynamic and irregular shapes and positions of fruits and vegetables, while ensuring their integrity and freshness. Due to the low efficiency of conventional harvesting control methods and their susceptibility to fruit damage, a flexible grasping force control method for the end effector of harvesting robots under impedance model is proposed. Based on the constraint condition of flexible grasping stability at the end of the harvesting robot, the relationship between the electromagnetic torque and speed of the finger end motor is analyzed using kinematic principles. The grasping force control signal is obtained using the Biot Savart law. Design a gripping force controller based on impedance model and second-order system, adjust the motor operation through second-order low-pass filter, obtain the expected position, speed, and acceleration for robot gripping, and complete the gripping force control task. The experimental results show that the impedance model can be applied to various fruit and vegetable picking scenarios, and the control error of the end flexible grasping force is small, with high stability, solving the problems of fruit and vegetable picking, and promoting the modernization and intelligence of agricultural production.

**Keywords:** impedance model; picking robots; grasping force; motor torque; motor speed; position controller

收稿日期: 2024 - 02 - 26

第一作者: 耿昕龙 (2000—), 男, 汉族, 陕西渭南人, 本科, 助理工程师, 研究方向为基于 PLC 系统的大型机械设备仪控部分的安装以及精度调试。E-mail: Gengxinl123@163.com

## 0 引言

在果蔬生产中, 采摘是整个生产环节最关键部分, 也是耗时最长、耗力最大的部分。由于农业劳动力短缺问题日益严重, 人工采摘方式已满足不了生

产需求,由此采摘机器人应运而生<sup>[1]</sup>。而在采摘机器人应用过程中,末端柔顺抓取力控制极其重要,因为不同的果蔬具有不同的表面特性、硬度及成熟度,需要抓取力均不同,过大会导致果蔬损伤,过小果蔬采摘时掉落,增加生产成本<sup>[2]</sup>。为此,研究其末端柔顺抓取力控制方法研究对于提升采摘的效率和果蔬的质量具有重要作用。

末端柔顺抓取力控制精度直接决定了机器人采摘效率及成本,国内外大量学者对其柔顺抓取力控制方法研究,并取得一定成果。姚莹<sup>[3]</sup>利用自适应跟踪方法建立抓取控制器,通过误差跟踪函数、Lya-punov 函数确定抓取控制参数。但自适应控制方法在实际应用中可能受到系统模型的不确定性、外部干扰以及传感器噪声的影响,导致控制器的收敛性和稳定性无法保证。张鹏伟等<sup>[4]</sup>为了缩小末端柔顺抓取力控制误差,利用 PID 控制设计末端柔顺抓取力控制器,利用模糊关联规则、模糊 C 均值聚类得出控制参数,完成控制任务。而该方法中模糊关联规则和模糊 C 均值聚类的设计涉及选择适当的输入和输出变量、确定模糊集合及其隶属度函数等,计算过程较复杂。ZUO W 等<sup>[5]</sup>为了降低机器人采摘损伤率,利用自抗扰控制设计末端柔顺抓取力控制系统,通过 Preisach 算子的补偿超调量,以实现高精度的控制。但自抗扰控制需要对多个参数进行调节,如控制增益、滑模面参数等。如果参数设置不当,容易导致控制系统不稳定或者出现震荡现象。Stolfi A 等<sup>[6]</sup>建立机器人抓取动力学模型,利用雅可比变换和比例导数控制实现柔顺抓取力高精度的控制。但该方法中雅可比变换和比例导数控制方法需要依赖于特定的输入信号实现高精度控制,控制过程具有一定的复杂性。

为了进一步提升采摘机器人末端柔顺控制精度,减少农作物损伤,提出阻抗模型下的采摘机器人末端柔顺抓取力控制。阻抗模型能够详细描述机器人在抓取过程中的动态特性,通过二阶低通滤波器调节自身参数,减小实际抓取力和期望力的偏差,提高抓取的稳定性和准确性,优化农产品采摘生产。

## 1 采摘机器人末端柔顺抓取稳定性约束

采摘机器人手指抓取点的空间位置与抓取能力存在密切联系,为使其能够在最佳位置进行抓取,对其手指抓取位置分析,以获得最佳抓取效果<sup>[7-8]</sup>。根据平衡约束条件,假设机器人各根手指抓取力相等,用 $f_a$ 表示, $a$ 为采摘机器人某一根手指, $a=1,2,$

3,在平面坐标系下,各根手指映射至 $x$ 轴、 $y$ 轴的合力求解过程为:

$$\begin{cases} \sum f_x = f_3 \cos(\alpha_2 - 90^\circ) - f_1 \cos(\alpha_1) \\ \sum f_y = f_2 - f_1 \sin(\alpha_1 - 90^\circ) - f_3 \sin(\alpha_2 - 90^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $f_x, f_y$  分别表示 $x$ 轴、 $y$ 轴的合力; $f_1, f_2, f_3$  即为采摘机器人各根手指抓取力; $\alpha_1, \alpha_2$  表示 $f_1$ 与 $f_2$ 夹角 $f_2$ 与 $f_3$ 夹角。

为了实现采摘机器人抓取平衡,则每根手指闭合时都要指向末端执行器的中心线,也就是保证施加物体上的合力为0<sup>[9]</sup>,对各根手指制定如下约束条件:

$$\begin{cases} \sum f_x = 0 \\ \sum f_y = 0 \\ 0^\circ < \alpha_1 < 180^\circ, 0^\circ < \alpha_2 < 180^\circ \\ f_1 = f_2 = f_3 \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)~(2)整理可得:

$$\alpha_2 = \alpha_1 = 120^\circ \quad (3)$$

根据式(3)可得,采摘机器人抓取最优位置即各手指间隔 $120^\circ$ 。这种稳定性约束设计可以使机器人的抓取力均匀分配在各个手指之间,从而实现对目标物体的稳定、均衡抓取,提高抓取的准确性和稳定性。

## 2 采摘机器人末端柔顺抓取力控制策略

### 2.1 机器人手指末端控制信号获取

为了能够精准地控制采摘机器人末端柔顺抓取力,对手指末端的电机电磁转矩与转速间关系进行分析,为抓取力控制提供理论支持。根据电机传动系统原理可得采摘机器人电机的电磁转矩与转速之间的运动方程<sup>[10]</sup>,即:

$$T_e = \frac{\alpha_1 J d\omega}{t} + T_b \quad (4)$$

其中: $T_e$ 为采摘机器人电动机的电磁转矩; $J$ 为采摘机器人电机传动系统的质量惯性矩; $t$ 为时间变量; $n$ 为电机转速; $T_b$ 为机械的阻转矩; $\omega, d\omega$ 为电机的角速度及其微分角速度, $\omega = 2\pi n$ 。采摘机器人电机的电磁转矩公式为:

$$T_e = \frac{2\pi n_p D l_1 F_1 F_2 \mu_0 \sin \psi_1}{l_2} \quad (5)$$

其中: $n_p$ 为电机磁极数; $F_1, F_2$ 分别为转子、定子绕组产生的电动势; $\mu_0$ 为真空磁导率; $D, l_1$ 分别表示气隙的圆周平均直径及沿轴向长度; $l_2$ 为定子与转子之间的长度; $\psi_1$ 即 $F_1$ 与 $F_2$ 间的夹角。各磁极下的气隙面积 $S_p$ 及平均磁通量密度 $B$ 计算过程为:

$$\begin{aligned} s_p &= \frac{\pi D l_1}{2 n_p} \\ B &= \frac{2 \mu_0 F_3}{\pi l_2} \end{aligned} \quad (6)$$

其中:  $F_3$  即为合成磁电动势。根据式(6)得出每极合成磁通,即:

$$\Phi = s_p \times B = \frac{D l_1 \mu_0 F}{n_p l_2} \quad (7)$$

设  $\psi_2$  为  $F_3$  与  $F_1$  间夹角,因采摘机器人电机内部结构为定子绕组凸极,设定  $\psi_2 = 90^\circ$ ,电枢绕组均匀分布,且每个导体之间的距离保持一致。根据毕奥-萨伐尔定律分析采摘机器人电机的转矩特性,则有:

$$T_e = \frac{I_1 n_p c_1 \Phi}{2 \pi c_2} \quad (8)$$

其中:  $c_1, c_2$  为采摘机器人电机导体数量及支路数量;  $I_1$  为电枢电流;  $\Phi$  为各极各相下的磁通。假设电枢与励磁在额定电压条件下作业,则有:

$$\begin{aligned} E &= C n \\ U_1 &= E T_e + I_1 R + L I_1 \end{aligned} \quad (9)$$

其中:  $C$  为电动势转速比;  $U_1$  为电机两端电压;  $R, L$  为电机等效电阻及电感。整理式(5)~式(9),得出采摘机器人电机驱动时电流公式,即:

$$I_1(z) = \frac{(JzU_1(z) + CT_i(z))}{JLz^2 + JRz + C^2} \quad (10)$$

当采摘机器人手指面与果蔬横截面垂直时,此情况即是抓取最优位置时,阻转矩  $T_i = 0$ ,则有

$$I_2(z) = \frac{JzU_1(z)}{JLz^2 + JRz + C^2} \quad (11)$$

当采摘机器人手指面与截面相交且不垂直时,指尖处会产生轴向阻转矩  $T$ ,根据式(10)与式(11)得出扭转过程中产生的电流,用  $\Delta I(z)$  表示,求解过程为:

$$\Delta I(z) = I_2(z) - I_1(z) = \frac{CT_i(z)}{JLz^2 + JRz + C^2} \quad (12)$$

其中:  $I_2(z)$  为输入电流;  $z$  为复数频率。  $\Delta I$  向电流环 PID 控制器反馈,获得电机 PWM 脉宽调制信号  $x(t)$ ,根据  $x(t)$  调节各根手指旋转关节电机转动。

在采摘机器人末端柔顺抓取力控制中,为了高效利用阻抗模型实现各根手指力控制,将  $x(t)$  进行数字数处理,阻抗模型控制信号为:

$$\Delta x(o) = \Delta I(z) [x(o) - x(o-1)] \quad (13)$$

其中:  $\Delta x(o)$  为  $x(t)$  的  $o$  时刻与  $o-1$  时刻的信号差值。根据  $\Delta x(o)$  了解采摘机器人 PWM 信号在时间上的变化情况,得出其抓取力平衡偏差值,下面根据此信号对其调节末端柔顺抓取力控制。

## 2.2 阻抗模型下抓取力控制策略

通过上述内容分析了电机的转矩特性、阻转矩和相关计算公式,明确了影响电机运动的关键参数,包括电机的磁极数、气隙长度、磁通量密度等,获取了阻抗模型控制信号,为建立阻抗模型及实现抓取力控制提供了必要的理论支持。

### (1) 阻抗模型建立

阻抗模型能够根据接触力与位置间关系,使采摘机器人手指处于最优位置进行抓取任务,同时保证恰当接触力,以实现高效抓取作业。其本质是将采摘机器人看成一个物理模型,并将其等效为一个由质量、阻尼及弹簧构成的二价系统,根据接触力和位置间动态变化关系建立阻抗模型,并将纳入控制系统中,实现力与位置并行控制,其阻抗数学模型为:

$$f_e = m_d(\ddot{X}_d - \ddot{X}) + b_d(\dot{X}_d - \dot{X}) + k_d(X_d - X) \quad (14)$$

其中:  $X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d$  即采摘机器人手指期望的位移、速度及加速度矢量;  $X, \dot{X}, \ddot{X}$  为实际手指的位移、速度、加速度矢量;  $m_d, b_d, k_d$  为手指期望的惯性、阻尼、刚度矩阵;  $f_e$  为手指末端与约束环境所生成的接触力。

### (2) 控制实现

阻抗模型主要有两种控制方式,一种是基于力,另一种是基于位置,而基于力方式需要指导采摘机器人运动方程每个参数,涉及运算量大,控制系统时延较长,降低末端柔顺抓取力控制性能,而基于位置控制方法能够根据采摘机器人手指与约束环境  $H(h)$  的  $f_e$ ,通过补偿方式将实际抓取位置变换成期望位置,以达到手指末端位置控制,同时对其末端接触力控制,进而实现抓取机器人末端柔顺抓取力高精度控制,整个控制过程如图 1 所示。

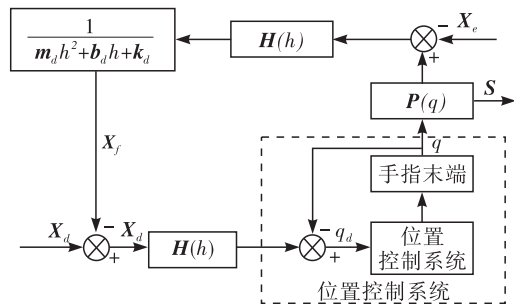


图 1 采摘机器人末端柔顺抓取力控制系统结构图

图 1 中,  $S = P(q)$  表示采摘机器人手指抓取运动状态,  $q$  表示手指关节角度,  $X_f$  表示  $f_e$  的位移误差补偿量,  $X_e$  表示补偿后位置结果,  $X_e$  表示补偿前位置结果,  $q_d$  表示关节与地面垂直距离,  $h$  表示环境变

量。若已知采摘机器人手指抓取期望位置,根据上述公式得出抓取力平衡偏差值,然后使手指关节和 $\mathbf{H}(h)$ 互相作用,生成一定量的 $f_e$ ,按照式(14)设计一个二阶低通滤波器<sup>[11-12]</sup>,通过 $\mathbf{X}_f$ 使 $f_e$ 间接变换成期望位置,然后将 $\mathbf{X}_e$ 作为位置控制器的输入信号,这样就能在位置控制同时实现 $f_e$ 的输出控制。

设定 $\mathbf{X}_f = \mathbf{S} - \mathbf{X}_d$ ,按照阻抗数学模型求解 $\mathbf{X}_f$ ,即:

$$f'_e = m_d \ddot{\mathbf{X}}_f + b_d \dot{\mathbf{X}}_f + f_e P(a) k_d \mathbf{X}_f \quad (15)$$

其中, $\dot{\mathbf{X}}_f$ , $\ddot{\mathbf{X}}_f$ 表示 $f_e$ 的速度、加速度误差补偿量。根据式(15)可知,此控制方法包含了采摘机器人手指接触力信息,为降低手指接触力跟踪问题的难度,在式(15)理论上添加参考力 $f_r$ ,得出力误差 $f_\sigma = f_r - f_e$ ,将其替换 $f_e$ ,进而完成力跟踪。改进后的阻抗模型为:

$$E = f_r - f'_e = m_d \ddot{\mathbf{X}}_f + b_d \dot{\mathbf{X}}_f + k_d \mathbf{X}_f \quad (16)$$

根据式(16)可知,当采摘机器人手指在自由空间作业时,且不与 $\mathbf{H}(h)$ 作用,也即是 $f_e = 0$ ,则假设 $f_r = 0$ ,得出 $\mathbf{X}_d = \mathbf{S}$ ,可完成采摘机器人末端柔顺控制;当其处于 $\mathbf{H}(h)$ 作业时,若内环控制器可实现高精度地控制位置,也就是 $\mathbf{X}_d = \mathbf{X}_e$ ,则位置补偿量 $\mathbf{X}_f = \mathbf{X}_d - \mathbf{S}$ ,令 $f_\sigma = f_r - f_e$ ,控制系统根据目标阻抗关系实时给出位置补偿量,以达到位置跟踪控制,并间接跟踪控制接触力,最终实现采摘机器人末端柔顺抓取力控制。

### 3 实验过程与结果分析

#### 3.1 实验环境及相关设定

为了检测阻抗模型的采摘机器人末端柔顺抓取力控制效果及适应能力,选取10种不同类型果蔬进行抓取实验,即苹果、橘子、橙子、菠萝、樱桃、草莓、西红柿、黄瓜、菠菜、茄子,每种物种各200个,共2000个果蔬,将这些果蔬作为实验研究对象。为了保证实验客观性,选在2023年9月2日上午10点光照条件适宜的情况下进行,且采摘机器人与控制中心之间的通信状态良好,实验现场图如图2所示,采摘机器人手指末端电机详情如表1所示。



图2 采摘机器人抓取环境

表1 采摘机器人末端电机相关参数

相关参数	数值
电机惯量	0.2 kg · m <sup>2</sup>
反电势系数	0.7 V/r · min <sup>-1</sup>
电机粘滞摩擦系数	0.28 N · m · s
功率放大器缩放系数	100 倍
转矩系数	0.9 N · m
导程	2.18 mm
电枢电阻	1.5 Ω

#### 3.2 采摘机器人末端柔顺抓取力稳定性分析

采用阻抗模型对10种果蔬进行抓取实验,分析所提方法的果实抓取的损坏情况,结果如图3所示。

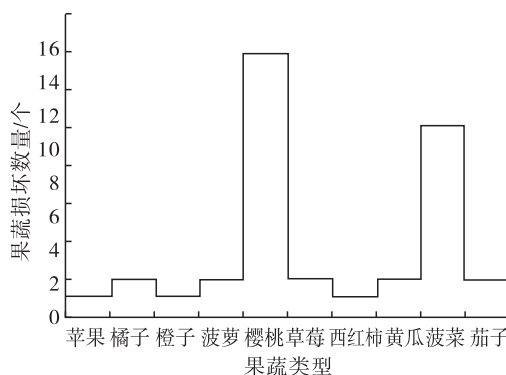


图3 采摘机器人末端柔顺抓取力控制分析

通过对10种不同类型果蔬抓取结果可知,阻抗模型抓取损坏总数量为37个,总损坏率为1.85%,而导致果蔬摘取损坏是因为果蔬出现轻微腐坏或者过度成熟,从整体上看,阻抗模型能够良好地完成机器人采摘任务。

#### 3.3 采摘机器人末端柔顺抓取力控制性能

##### (1) 抓取力控制分析

为了验证阻抗模型采摘机器人末端柔顺抓取力控制性能,实验环境不变,分析阻抗模型的采摘机器人手指末端各个果蔬抓取力情况,结果如图4所示。

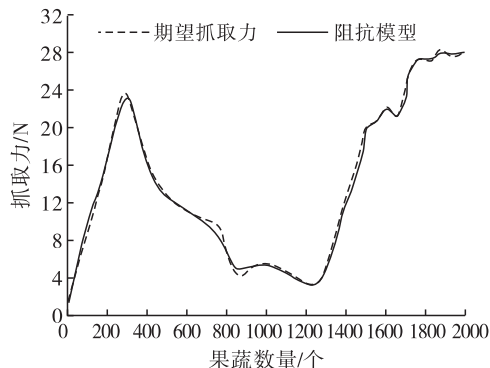


图4 各个果蔬接触力情况

通过图4可以明显发现,阻抗模型获得各个果蔬抓取力基本上与期望抓取力基本一致,这是因其



通过机器人末端抓取设备与环境之间的相互机理,自适应调整阻抗参数,进而实现不同抓取场景下不同果蔬类别的高精确控制。

### (2) 抓取力控制误差分析

抓取力控制误差是衡量采摘机器人末端柔顺抓取力控制性能关键指标之一,实验从抓取力控制误差角度进一步验证,将自适应跟踪方法、PID 控制作为对比方法,分析 3 种方法的末端柔顺抓取力控制误差情况,结果如图 5 所示。

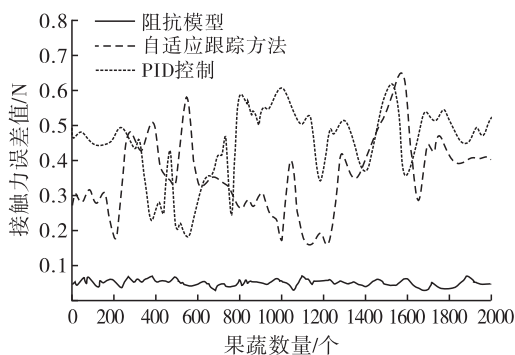


图5 末端柔顺抓取力控制误差情况

根据图 5 可知,3 种方法各果蔬抓取力控制误差均在 1 N 之内,说明这 3 种方法都能良好地实现末端柔顺抓取力控制,而阻抗模型抓取力控制误差仅在 0.1 N 之内,控制性能最佳,这是因为其利用二阶低通滤波器,在调整采摘机器人手指末端抓取位置,同时间接调整接触力,双重控制,进而缩小采摘机器人末端柔顺抓取力控制误差。

### (3) 力的变化率

力的变化率是评估机器人末端柔顺抓取过程中机器人施加在目标物体上的力的变化速度,也就是其抓取力控制稳定程度,力的变化率越小越好,说明此方法抓取力控制稳定越好,果蔬物体发生晃动或损伤概率越小。为此将力的变化率作为实验评估指标。随机选取一个果蔬进行采摘实验,分析 3 种方法末端柔顺抓取力控制稳定性,结果如图 6 所示。

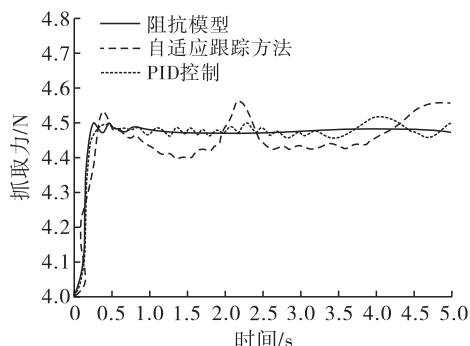


图6 末端柔顺抓取力控制稳定性分析

图 6 中明显看出,阻抗模型力变化率曲线波动极小,基本上趋于一条水平直线,末端柔顺抓取力控制稳定性极好,这是因为所提方法能够根据位置与抓取力之间关系实时调整采摘机器人手指状态,使其处于最佳状态完成采摘任务。

## 4 结论

为了降低机器人果蔬采摘损伤率、提升生产效率,提出一种阻抗模型下的采摘机器人末端柔顺抓取力控制。根据电机传动系统理论、拉普拉斯变换得出采摘机器人手指抓取力与电机转动间关系,为其末端柔顺抓取力控制提供数据支持,利用阻抗模型设计抓取力控制器,通过二阶低通滤波器实现抓取力控制。实验结果表明,阻抗模型可实现采摘机器人末端柔顺抓取力控制,且控制精度高、系统稳定性强,从而提高了采摘效率和作业能力。

### 参考文献:

- [1] 毕松,张璐. 自然环境下的柑橘采摘点识别方法研究[J]. 计算机仿真,2021,38(12):227-231.
- [1] 黄才贵. 基于机器视觉的百香果采摘分级机器人平台的设计[J]. 农业技术与装备,2022(01):54-56.
- [3] 姚莹. 多自由度机器人抓取末端振动自动稳性控制技术[J]. 机械制造与自动化,2023,52(04):164-168.
- [4] 张鹏伟,李学威. 接触状态感知下分拣机器人抓取过程多参数挖掘控制技术[J]. 机械设计与研究,2023,39(05):24-28+33.
- [5] ZUO W, SONG G, CHEN Z. Grasping force control of robotic gripper with high stiffness[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 27(2):1105-1116.
- [6] STOLFI A, GASBARRI P, MISRA A K. A two-arm flexible space manipulator system for post-grasping manipulation operations of a passive target object[J]. Acta Astronautica, 2020, 175(Oct):66-78.
- [7] 张静,杜博,李昌璐,等. 苹果采摘机器人末端设计及运动仿真[J]. 液压气动与密封,2023,43(06):20-25.
- [8] 张之红. 分裂迭代算法在采摘机器人运动控制中的应用[J]. 农机化研究,2023,45(11):199-203.
- [9] 王文远,富荣昌,曹富. 基于动捕对仿人采摘机械臂运动学分析与仿真[J]. 农机化研究,2023,45(03):8-16.
- [10] 程培宝,康满仓. 未知时变环境下采摘机器人电液伺服控制系统[J]. 机械与电子,2023,41(03):55-59+64.
- [11] 孙永芳. 基于 STM32 的水果采摘机器人控制系统设计与实现[J]. 农业工程,2022,12(02):43-47.
- [12] 李小斌,吴宏岐,陈渭红,等. 一种苹果采摘机器人关节伺服控制系统设计及仿真[J]. 计算机测量与控制,2021,29(03):129-134.