

# 串番茄采摘末端执行器的设计与夹持实验

段红燕, 李世杰, 杨 浩

(兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: 基于串番茄生长特性和采摘要求,设计了一种适用于采摘成串番茄的末端执行器。基于螺旋理论,建立了夹持接触力学模型,分析了夹持的力封闭性;同时,建立了稳定夹持模型,对夹指的可靠夹持力进行了分析,得出夹持力  $F \geq 8.24\text{N}$ 。制作了物理样机,并对直径为 3~8mm 的串番茄母枝进行了负重干扰性能的夹持实验,实验结果表明:夹指所能承受的动态负重随母枝直径的增大而增大,最小动态负重为 1.015kg,完全满足采摘串番茄时的夹持能力需求。

关键词: 末端执行器; 夹持; 采摘; 串番茄; 螺旋理论  
中图分类号: S225; TP242 文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2021)01-0057-05

## 0 引言

串番茄又名穗番茄,是近年来流行于国内外市场的一种成串收获上市的新型番茄品种,由于其果实颜色、果穗货架寿命、果实硬度和果实品质等方面很多突出特点,深受消费者的喜爱<sup>[1]</sup>。随着我国科技的发展,机器人采摘逐渐代替了人工来改善劳动条件,提高工作效率,降低了采收成本。机器人通过末端执行器对果蔬进行采收,末端执行器是直接与果蔬接触的重要部件<sup>[2]</sup>,对果蔬的采摘效率、采摘损伤率及采摘范围都有重要的影响。

由于果蔬的生长习性、采摘要求的差异,国内外学者已对各种果蔬的采摘末端执行器进行了大量的研究<sup>[3]</sup>。针对番茄、苹果、柑橘等球状果蔬的采摘,学者们采用了拟人指、吸盘式及咬合式等方式的末端执行器<sup>[4-7]</sup>,而对成串采摘夹持母枝类的末端执行器研究较少。

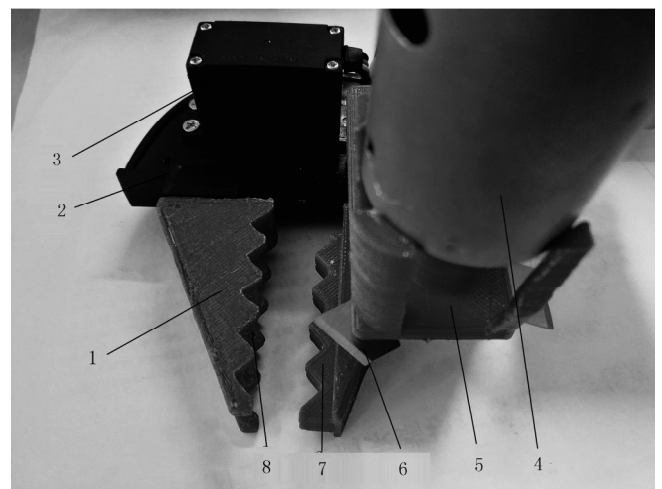
为此,以采摘成串的串番茄为研究对象,设计了针对成串采摘末端执行器,基于力螺旋理论来分析了指的力封闭性,同时对夹持力进行了分析,并制作了物理样机,进行了负重干扰性能的夹持实验。

## 1 末端执行器的设计

收稿日期: 2019-07-05  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51665028); 甘肃省兰州市科技局基金项目(2015-RC-44)  
作者简介: 段红燕(1977-),女,河北邯郸人,副教授,硕士生导师,(E-mail) duanh@lut.edu.cn。  
通讯作者: 李世杰(1992-),男,甘肃武威人,硕士研究生,(E-mail) 1070452489@qq.com。

### 1.1 整体结构及工作原理

串番茄成串生长,人工采摘时首先用手稳定抓住整串番茄,然后用剪刀将母枝部位成串剪下。根据采摘方式,设计了一种成串采摘的末端执行器,能将串番茄稳定夹持并且成串采摘。该执行器主要由夹持机构、切割装置、驱动等部分组成,主要结构如图 1 所示。



1. 左夹指 2. 夹指导轨 3. 舵机 4. 切割电机 5. 电机机架  
6. 旋转刀片 7. 右夹指 8. 凹槽

图 1 末端执行器整体结构图

Fig. 1 Whole structure diagram of end-effector

采摘工作时,由机械手带动末端执行器运动到所夹持的位置,舵机输出扭矩实现左右夹指在运动导轨上做相对运动,右指的凸出“v”进入左指的凹槽形成了双“v”式夹持住串番茄母枝;夹持稳定后,安装于夹指上方的旋转刀片在切割电机的驱动下完成对串果与母枝的分离,分离后切割电机停转;机械手带动末端执行器把成串的番茄送到果箱,舵机反转夹指松开

串果,完成串番茄的采摘。

1.2 夹持模块

1.2.1 夹持的力封闭性分析

末端执行器是否能稳定夹持和所提供的夹持力是衡量夹持任务的重要因素之一<sup>[8]</sup>,而判断是否能稳定夹持可以用力螺旋理论来分析夹持的力封闭性<sup>[9]</sup>。

在串番茄的实际采摘过程中,可以把串番茄母枝看为圆柱形,两夹指靠各自的“v”形端面约束母枝并施加足够的加紧力才能实现稳定夹持。根据分布接触应力与集中点接触合力的等效性,手指每个面的接触力约束可简化为一个空间摩擦点的接触约束模型<sup>[10]</sup>,故对母枝的夹持作用可以看做为四指对母枝的夹取。夹持串番茄母枝的夹持模型如图 2 所示。以串番茄母枝回转方向为 Z 轴,以母枝的横截面为 XOY 二维平面,建立坐标系,力在各夹持接触点处建立接触坐标系。

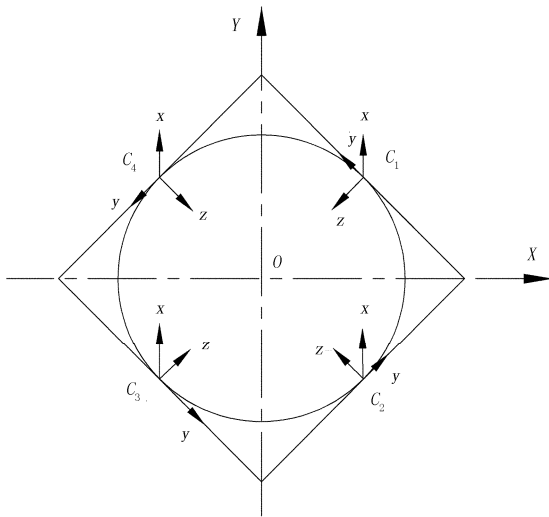


图 2 串番茄夹持模型

Fig. 2 String tomato clamping model

第  $i$  个接触点相对于夹持处母枝坐标的位置,姿态用  $(P_{ci} R_{ci})$  表示。第  $i$  个接触点作用于夹持处母枝的接触力螺旋为

$$f_i = (f_{ix} f_{iy} f_{iz}) \quad (1)$$

双“v”夹指作用于串番茄的接触力螺旋  $F$  为

$$F = (f_1 f_2 f_3 f_4) \quad (2)$$

螺旋基是力螺旋相对于接触坐标系的方向基,其维数表示接触所能独立施加的力向量的集合。线接触力螺旋基于接触力向量分别为

$$B_{ci} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

$$F_{ci} = B_{ci} f_{ci} \quad (5)$$

$$F_{ci} \in FC_{ci} \quad (6)$$

$$FC_{ci} = \{f \in R^6: \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \leq \mu f_z, f_z \geq 0\} \quad (7)$$

接触坐标系  $C_i$  相对于物体坐标  $C_o$  的位姿为  $(P_{oci} R_{oci})$ ,在  $C_i$  坐标系下的接触力变换到  $C_o$  坐标系下可以写为

$$F_o = Ad_{C_{oi}}^T F_{ci} = \begin{pmatrix} R_{oci} & 0 \\ P_{oci} R_{oci} & R_{oci} \end{pmatrix} B_{ci} f_{ci} \quad (8)$$

$$G_i = \begin{pmatrix} R_{oci} & 0 \\ P_{oci} R_{oci} & R_{oci} \end{pmatrix} B_{ci} \quad (9)$$

则  $n$  个条线接触作用在物体上的力螺旋转化到物体坐标系  $C_o$  下为

$$F_o = \sum_{i=1}^n F_{oi} = \sum_{i=1}^n G_i f_i = [G_1 \cdots G_n] f_c = [f_{c1} \cdots f_{cn}]^T \quad (10)$$

式(10)可以写为

$$F_o = G f_c^T \quad (11)$$

根据抓取的力封闭性,对于任意外力  $F_e \in R^6$ ,当夹持稳定时,根据力平衡与力矩平衡有

$$F_o = \sum_{i=1}^n G_i f_i = G f_c = -F_e \quad (12)$$

因此,可以通过式(12)分析一定预紧力作用下,机械手抓持一定质量的力封闭性,为机械手控制系统实现稳定夹持提供依据。各接触坐标相对于串番茄坐标系位置和姿态为

$$P_{c1} = (-\frac{\sqrt{2}}{2}r, \frac{\sqrt{2}}{2}r, 0) \quad P_{c2} = (\frac{\sqrt{2}}{2}r, \frac{\sqrt{2}}{2}r, 0)$$

$$P_{c3} = (\frac{\sqrt{2}}{2}r, -\frac{\sqrt{2}}{2}r, 0) \quad P_{c4} = (-\frac{\sqrt{2}}{2}r, -\frac{\sqrt{2}}{2}r, 0)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad R_4 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

根据式(4)和式(8)得抓取点抓取矩阵为

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2}r & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2}r & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 \end{bmatrix} \quad G_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2}r & 0 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix}$$

$$G_3 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2}r & 0 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}r & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 \end{bmatrix}$$

$$G_4 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}r & 0 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}r & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 \end{bmatrix}$$

摩擦锥满足: 式(6)和式(7)对于给定的施加于物体上的任意外力螺旋  $F_e = [0 \ 0 \ 10 \ 0 \ 0 \ 0]N$ , 满足式(12)。

综上所述, 所设计的双“v”夹指模块设方案, 能够稳定夹持串番茄母枝, 满足力封闭性原则。

### 1.2.2 夹持力的计算

夹持模块的作用为预压紧并定位串果的母枝, 有利于剪切<sup>[11]</sup>。当串番茄母枝剪断后夹指能提供足够的夹紧力夹持住成串番茄, 避免其掉落造成损伤。双“v”夹指与母枝受力分析, 如图 3 所示。

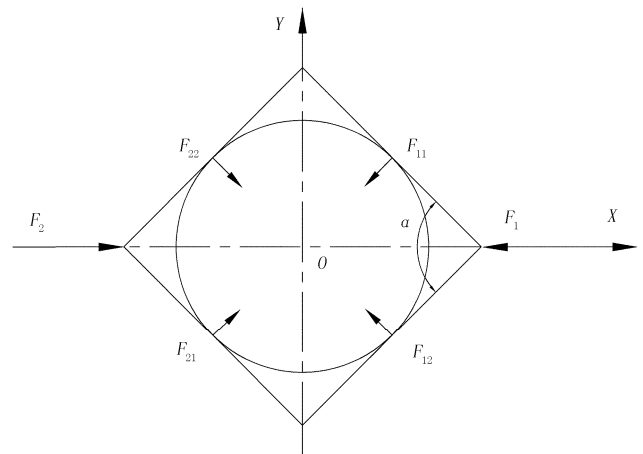


图 3 稳定夹持力学分析图

Fig.3 Stability clamping analysis diagram

在夹持母枝的过程中, 使双“v”型手指各面与母枝产生的加紧力  $F_{11}$ 、 $F_{12}$ 、 $F_{21}$ 、 $F_{22}$ , 当夹指加紧果实时, 可以把夹持的串番茄母枝视为规则的圆柱体。以母枝的回转中心为 Z 轴, 以母枝的横截面为 XOY 二维平面, 且 O 点在 Z 轴上。作用在双“v”型手指上的加紧力分别为  $F_1$  和  $F_2$ , 由于结构对称型, 预紧作用力  $F_1$  与  $F_2$  是相等的。双“v”型夹指各面与母枝产生的加紧力  $F_{11}$ 、 $F_{12}$ 、 $F_{21}$ 、 $F_{22}$ , 建立夹持力学模型。作用于双“v”型手指的预紧力与夹指作面接触区域的合力关系为

$$F_{11} = F_{22} = F_1 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (13)$$

当夹指能稳定夹持串番茄时, 其静力平衡方程为

$$\mu F_i = G \quad (14)$$

由结构对称性可知

$$F_{11} = F_{12} \quad (15)$$

$$F_{21} = F_{22} \quad (16)$$

$$F_{11} = F_{12} = F_{21} = F_{22} \quad (17)$$

成串番茄采摘的质量不超过 1kg, 取  $G = 10N$ , “v”型手指两斜面的夹角为  $\alpha = 90^\circ$ , 夹持面摩擦因数  $\mu = 0.6$ , 则串番茄稳定夹持时, 四点正压力为  $F_{11} = F_{12} = F_{21} = F_{22} = 4.12N$ , 所以只要夹紧力  $F_2 = F_1 \geq 8.24N$  时可以保证串番茄不会掉落。

### 1.3 剪切模块

在采摘中末端执行器稳定夹持对象后, 可以采用扭断或切割等方式实现果实与果梗的分离。串番茄成串采摘中, 剪割方式更适合对成串番茄与母枝的分离。本文设计的串番茄切割装置主要由电机、旋转刀片、电机机架组成, 3 块旋转刀片成  $120^\circ$  排列, 且高度可调, 电机安装在机架的上方。当夹持手指稳定夹持住串番茄母枝后, 电机启动, 带动旋转刀片旋转对其进行分离, 切割完后电机停止转动, 切割结束。

## 2 实验分析

### 2.1 静态和动态负重实验

根据末端执行器的设计方案制作了物理样机,并进行了负重性能实验。串番茄采摘时,如果末端执行器工作时夹持失败,则造成串番茄滑落损伤。通过负重实验可以考察该末端执行器的最大夹持稳定质量。在采摘时串番茄会受到外界干扰(切割、机器人产生的振动或者放置串番茄过程中的摆动等),会使串果发生摆动。本文进行了静态和动态负重实验,图4为负重实验现场。



图4 负载实验

Fig.4 Load experiment

1) 静态负重实验:在串番茄母枝的一端吊挂重物,另一端稳定夹持于末端执行器。在夹持时避开串番茄结点处,应保证末端执行器只夹持光滑的母枝;夹持过程中,不断添加重物每次添加间隔不少于30s,直到母枝发生滑动或者脱落,并记录负重质量。

2) 动态负重实验:采摘时串番茄受到外界环境的干扰会发生摆动,一般情况下这种摆动不会很大,本文选择120°的摆角进行实验。夹持方式与静态负重夹持实验时相同,然后对重物分别进行在X、Y方向扳至于Z方向呈60°夹角后松开使重物做120°单摆运动(摆动周期为5);当母枝在夹指中不发生可见滑动或者不发生脱落,再进行增加物重,直到重物脱落或者母枝在夹指中发生滑动,并记录负重质量。

### 2.2 结果分析

实验表明:静态负重时的负重干扰强度高于动态负重的干扰强度;随着母枝直径的增大,最大负重质量也在增大;3~6mm的母枝在x轴方向摆动的抗干扰能力强于在y轴方向摆动的抗干扰能力,在动态实验中也可以看出重物在y方向摆动时夹持住的母枝晃动最大,在x方向晃动最小;母枝直径分别为7、8mm,随着母枝直径的增大,负重也在不断增大,由于本文中所设计出的末端执行器材料的原因,夹持7、8mm的母枝时静态负重时加载到2.600kg时会发生较大的弹性形变,故停止了对重物的加载,但动态负重都明显大于在夹持6mm的母枝。串番茄母枝直径与末端执行器最大负重关系曲线,如图5所示。

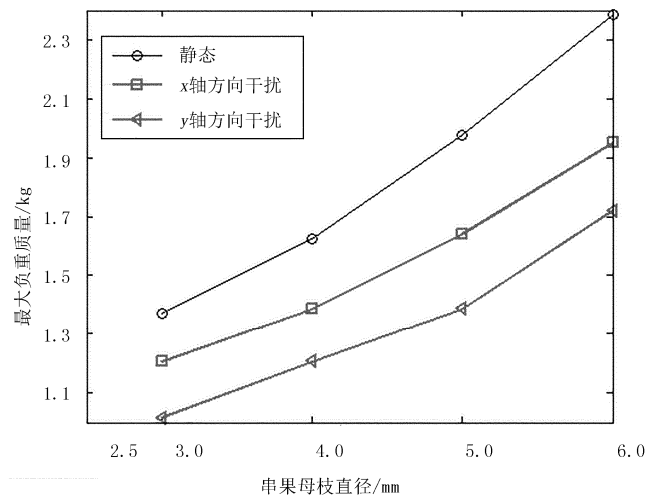


图5 串果母枝直径与负载关系

Fig.5 Relationship between diameter and load of cluster parent branches

实验结果表明:本文所设计的末端执行器,静态负重下最小可夹持2.385kg的串果,在动态负重下最小可夹持1.015kg的串果。调研甘肃省永靖县刘家峡温室大棚串番茄可知:(3±0.2)mm的母枝最大串果质量为0.520kg,所以本文所设计的串番茄采摘末端执行器完全能用于串番茄夹持作业。

## 3 结论

1) 依据串番茄各方面的生长特性,设计了一种能适用于串番茄采摘的双“v”夹持式末端执行器,可实现对成串番茄的稳定夹持。

2) 末端执行器结构简单,可以实现对成串番茄的夹持,最小夹持力为8.24N。

3) 制作出样机,并对串番茄直径为3~8mm母枝进行了负重性能检测,结果表明:随母枝直径的增加动态负重能力也在增加,动态负重下末端执行器夹持最小力为1.015kg,满足采摘时所需负载。

## 参考文献:

- [1] 吴志刚,冯辉,徐娜,等.串番茄品种的特征特性和应用状况[J].长江蔬菜,2006(2):36-38.
- [2] 宋健,张铁中,徐丽明,等.果蔬采摘机器人研究进展与展望[J].农业机械学报,2006(5):158-162.
- [3] 李国利,姬长英,翟力欣.果蔬采摘机器人末端执行器研究进展与分析[J].中国农机化学报,2014,35(5):231-236,240.
- [4] 刘继展,李萍萍,倪齐,等.番茄采摘机器人真空吸盘装置设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(10):170-173,184.
- [5] 罗陆锋,文汉锦,谭远良,等.欠驱动拟人指末端抓取机构设计[J].轻工科技,2018,34(7):78-79,84.
- [6] 王毅,许洪斌,张茂,等.仿蛇嘴咬合式柑橘采摘末端执行器设计与实验[J].农业机械学报,2018,49(10):54-64.
- [7] Kondo N, Yata K, Iida M, et al. Development of an end-effector for a tomato cluster harvesting Robot [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2010, 3(1):20-24.
- [8] 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].农业机械学报,2018,49(1):35-41.
- [9] 左炳然,钱文瀚.机器人多指抓取力封闭分析的非线性规划算法[J].机械工程学报,1999,35(2):19-22.
- [10] 李群明,高丹,邓华.重载夹持装置接触力的封闭性[J].机械工程学报,2010,46(11):36-42.
- [11] 叶敏,邹湘军,杨洲,等.荔枝采摘机器人拟人指受力分析与夹持试验[J].农业机械学报,2015,46(9):1-8.

## Design and Clamping Experiment of End Effector for Picking String Tomato

Duan Hongyan, Li Shijie, Yang Hao

(Mechanical and Electrical Engineering Institute, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In order to promote the mechanization of cluster tomato picking, based on the growth characteristics and picking requirements of cluster tomatoes, this paper designed an end-effector suitable for cluster tomato picking. Based on the spiral theory, the mechanical model of clamping contact is established, and the force sealing property of clamping is analyzed. At the same time, a stable clamping model was established to analyze the reliable clamping force of the fingers, and it was concluded that the clamping force  $F \geq 8.24\text{N}$ . At last, a physical prototype was made, and the clamping experiment of load-bearing interference performance was carried out on it. The experimental results showed that: when the diameter of bunch tomato mother branch was 3-8mm, the dynamic load-bearing capacity of the clamping finger increased with the increase of the diameter of the mother branch, and the minimum dynamic load-bearing capacity was 1.015kg. The end-effector can fully satisfy the gripping ability of picking bunch tomatoes.

**Key words:** end-effector; clamping; picking; string tomato; spiral theory