

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.02.020

鸡枞菌锥形削根装置设计

Design of conical root cutting device for *Oudemansiella raphanipes*

李一欣¹ 赵明岩¹ 周乔君¹ 梁喜凤¹ 蔡为明²

LI Yi-xin¹ ZHAO Ming-yan¹ ZHOU Qiao-jun¹ LIANG Xi-feng¹ CAI Wei-ming²

胡剑虹¹ 谢崇阳¹ 陈涛¹ 蔡晖¹

HU Jian-hong¹ XIE Chong-yang¹ CHEN Tao¹ CAI Hui¹

(1. 中国计量大学, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江省农业科学院园艺研究所食药食用菌育种与栽培研究室, 浙江 杭州 310021)

(1. China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; 2. Laboratory of Edible and

Medicinal Fungi Breeding and Cultivation, Institute of Horticulture, Zhejiang Academy of

Agricultural Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310021, China)

摘要:针对鸡枞菌人工锥形削根速度慢、一致性差等问题,设计了锥形削根装置。该装置采用两个对称布置的四连杆机构,连杆刀片运动轨迹呈腰形,两个刀片的直线工作段形成圆锥包络,实现鸡枞菌根部锥形切削。装有摄像头的机械臂识别、抓取并精确控制鸡枞菌进入切削区域的深度,实现精准切削。试验结果表明:两个连杆刀片在0.8 s内共进行12次作业,完成锥形切削;装置可在6 s内实现1个鸡枞菌的抓取、切削、分级,不仅速度快,且一致性更好。以菇柄直径为12 mm的鸡枞菌为例,对比人工削根形成的7棱、6棱、5棱和4棱锥,试验装置削根可分别减少7.5%, 9.1%, 13.9%, 24.4%的根部浪费率。

关键词:鸡枞菌;锥形削根;圆锥包络;机械臂

Abstract: This conical root-cutting device was designed to solve the problem of slow rooting and poor consistency of artificial cone rooting about *Oudemansiella raphanipes*. The cutting device adopts two symmetrically arranged four-bar linkage mechanisms, and the connecting rod blade forms a waist-shaped motion track. By forming a cone-shaped envelope, this device could realize the taper cutting of the root of the *O. raphanipes*. The industrial robot which equipped with the camera recognizes could capture and precisely control the depth of the *O. raphanipes* into the cutting area. The experimental results indicated that the two connecting

rod blades performed a total of 12 operations in 0.8 s to complete the taper cutting. The robot could capture, cut and classify one *O. raphanipes* in 6 s. Taking the *O. raphanipes* stalk with a diameter of $\varphi 12$ mm as an example, compared with the 7-pyramid, 6-pyramid, 5-pyramid, and 4-pyramid formed by artificial root cutting, the root-cutting of the robot could reduce root waste by 7.5%, 9.1%, 13.9%, and 24.4%, respectively.

Keywords: *Oudemansiella raphanipes*; tapered root cutting; cone envelope; robotic arm

鸡枞作为一种高档菌菇^[1],营养价值极高^[2-3],价格为普通香菇的10倍左右,且其需求量逐年增加,2018年鸡枞菌年产量已超过2万t^[4]。由于鸡枞菌根部富含多种微量元素,且根部呈60°类圆锥型,为最大限度减少浪费,需对鸡枞菌根部进行锥形削根。根部锥形切削通常需要8~10刀,但为了加快速度,工人经常6~8刀,甚至4~5刀便完成一个鸡枞菌的削根,容易造成了鸡枞菌根部的浪费。目前鸡枞菌削根处理均由人工完成,生产效率低、一致性差、浪费率高且人工操作具有一定的危险性,劳动力短缺及老龄化现象严重制约了鸡枞菌行业的规模化发展。

目前,针对菌菇的研究主要集中于菌菇品质^[5-6]、营养成分^[7]、提取加工^[8-9]、培育^[10-11]等方面,而对菌菇去根技术研究较少,高汉斌等^[12]设计了基于电荷耦合器件(CCD)传感器的香菇去根系统,但无法实现精准去根;陈红等^[13]通过去除特征参数间的相关性及使用模式识别的方法建立菌菇类型模型,可区分白花菇等不同菌种。试验拟设计双四连杆锥形削根装置,并对装置切削轨迹进

基金项目:青年科学基金项目(编号:51605462);浙江省自然科学基金(编号:LQ16E050001)

作者简介:李一欣,男,中国计量大学在读硕士研究生。

通信作者:赵明岩(1974—),中国计量大学副教授,硕士。

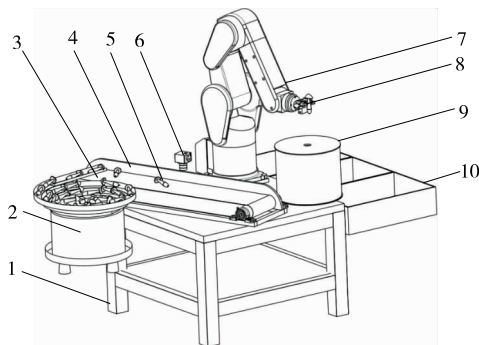
E-mail: zhaomingyan168@126.com

收稿日期:2019-10-06

行运动仿真^[14],采用机器视觉技术^[15],通过摄像头识别鸡枞菌位置、姿态、抓取部位等信息,通过数据传输给机械臂实现抓取^[16-17],随后切削终端完成锥形切削动作,以实现鸡枞菌锥形削根。

1 整机结构与工作原理

如图1所示,鸡枞菌锥形削根装置由机架、输送带、摄像头、机械臂、机械手、切削装置等组成。鸡枞菌从振动盘出料后,到达输送带,机械臂通过摄像头定位抓取鸡枞菌并送至切削工位。切削装置由两个四连杆机构组成,分别装有切削刀片,刀片高速旋转,实现鸡枞菌根部的锥形切削。切削完成后,根据鸡枞菌粗细等形状特征信息进行筛选分级,再通过机械臂将其放入相应的分级箱。



1. 机架 2. 振动盘 3. 输送带 4. 挡边 5. 鸡枞菌 6. 摄像头
7. 机械臂 8. 机械手 9. 切削装置 10. 分级箱

图1 结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of the whole machine

2 鸡枞菌锥形削根装置设计

2.1 整机系统组成

如图2所示,装置系统包括机械臂、机械手爪、摄像头、单片机、触摸屏等。摄像头检测到鸡枞菌到达输送带后,将图像发送至PC,得出鸡枞菌大小、形状、位置、姿态,机械臂到达鸡枞菌所在位置,机械手执行抓取动作^[18-20]并控制鸡枞菌根部进入切削区域的精确深度。

控制系统电路模块图如图3所示,该系统分为控制部分与执行部分。控制部分STM32F103采用Cortex-M3内核处理器,具有单周期乘法和硬件除法,配有多个定时器,且每个定时器具有4个完全独立的输出通道,可进行多线程的工作;控制部分负责鸡枞菌图像处理、



图2 整机系统

Figure 2 Machine system

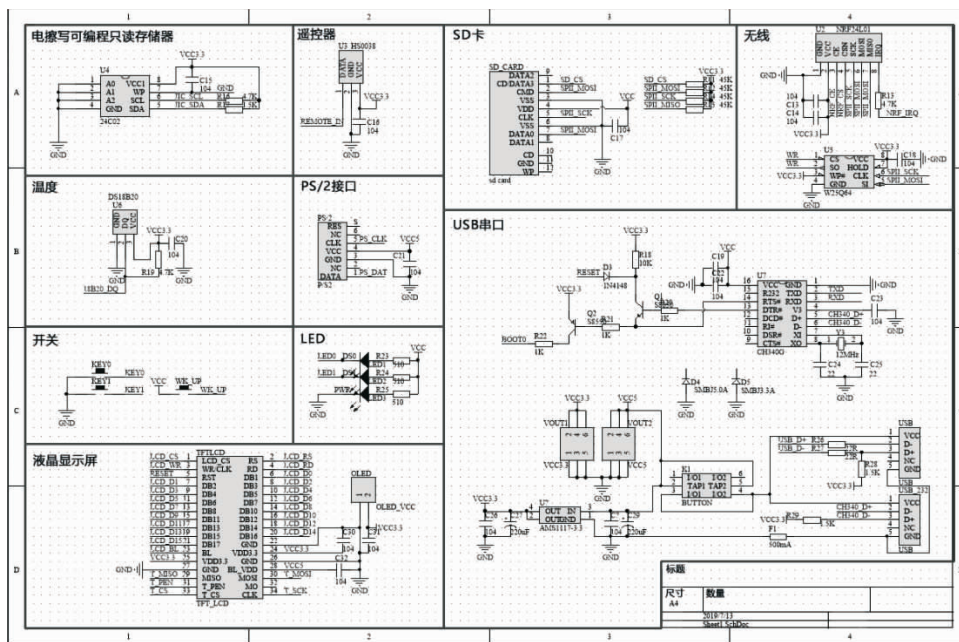


图3 控制系统电路模块图

Figure 3 Control system circuit block diagram

MG996R 舵机驱动及控制算法的运作。执行部分 MG996R 舵机接收由 CPU 发出的 PWM 信号,控制电机转动。

2.2 图像识别部分

摄像头将捕捉到的鸡枞位置、大小、形状、姿态等信息传送给专用的图像处理系统,得到被摄目标的形态信息。PC 根据像素分布和亮度、颜色等特征,将图片信息转变成数字信号进行准确处理。图像系统对这些信号进行如图 4 所示的运算来抽取目标特征,PC 根据判别结果控制机械臂的动作^[21]。当机械臂对当前鸡枞菌进行抓取、切削等动作时,下一个鸡枞菌即随输送带到达指定位置并由摄像头采集信息,进行图像识别工作。

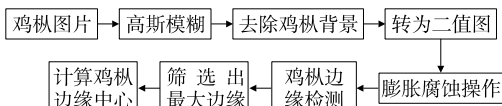


图 4 视觉识别流程图

Figure 4 Visual recognition flow chart

2.3 关键部件设计

2.3.1 机械手爪 由图 5 可知,机械手爪的两个抓取夹片由回转型加紧结构控制。动力原件采用舵机,舵机驱动夹片夹紧鸡枞菌,可根据菇柄直径适当调整夹紧程度。由于鸡枞菌菇柄刚度较普通香菇大,且机械手爪前端设有记忆海绵,在夹取过程中能适应鸡枞菌柄部形状,不会对菌体造成损伤。因此,对不同形状、尺寸的鸡枞菌,机械手爪具有一定的自动适应能力。当单片机控制舵机动作时,夹片收拢,待夹紧鸡枞菌后,机械臂将其运送至切削装置上方,完成削根作业,如图 6 所示。

2.3.2 削根装置 由图 7 可知,削根装置由两个对称布置的四杆机构组成,连杆上装有切削刀片。同步轮 II 带动主动锥齿轮 6 转动,驱动左侧锥齿轮 7 与右侧锥齿轮 5。左侧锥齿轮 7 带动同步轮组 12 一起运动,同步轮组 12 与圆盘 4 相连,当圆盘 4 运动时,带动连杆 3 及安装在连杆 3 上的刀片一起运动。同步轮 I 在电机驱动下,带动平台 11 及安装在平台 11 上的两个支架 13 一起转动,

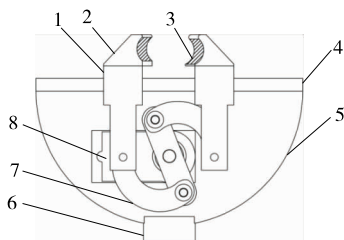


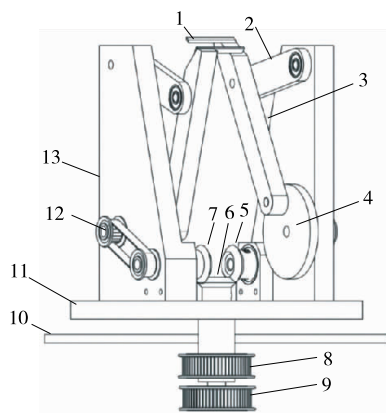
图 5 机械手爪

Figure 5 Mechanical gripper



图 6 切削作业示意图

Figure 6 Schematic diagram of cutting operation



1. 切削刀片 2. 摇杆 3. 连杆 4. 圆盘 5. 右侧锥齿轮 6. 主动锥齿轮 7. 左侧锥齿轮 8. 同步轮 I 9. 同步轮 II 10. 机架 11. 平台 12. 同步轮组 13. 支架

图 7 切削装置

Figure 7 Cutting device

使两个四连杆机构跟随平台 11 一起公转。将鸡枞菌根部放入切削区,两个四杆机构随平台 11 公转,结合自身在同步轮组驱动下形成的自转运动,完成鸡枞菌的锥形削根。

切削装置三维仿真图如图 8 所示,当切削装置运转时,切削刀片以腰形曲线进行自转,并随四连杆机构绕平台转动轴线公转。采用 450 r/min 原动机,锥齿轮传动



(a) 切削前

(b) 切削后

图 8 切削装置三维仿真图

Figure 8 3D simulation of cutting device

比、同步带轮传动比均为 1:1,可得两个刀片自转速度均为 7.5 r/s,即 1 s 内两个刀片共对鸡枞菌切削 15 刀。按 12 刀切削一个鸡枞菌计算,0.8 s 即可完成一次作业。

机构仿真模型图与机构运动示意图如图 9 所示。假设圆盘(即曲柄 AB)顺时针方向转动为正,对四连杆机构进行运动学分析。 $l_1、l_2、l_3、l_4、l_5$ 分别为 AB、BC、CD、DA、CE 线段长度; θ_1 为 AB(曲柄)与 AD(机架)的夹角; θ_2 为 BC(连杆)与 AD(机架)的夹角; θ_3 为 AD(机架)与 Y 坐标轴的夹角。

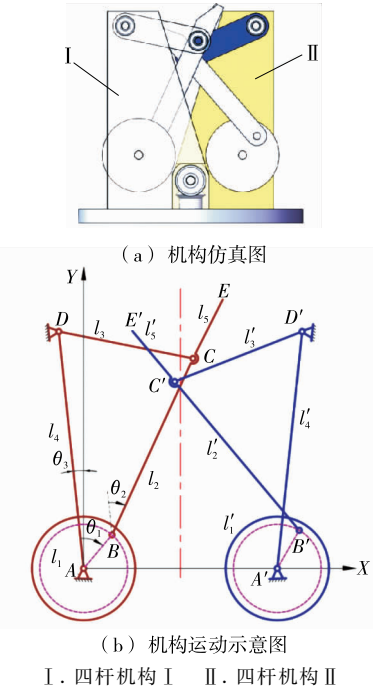


图 9 双四连杆机构切削装置运动分析
Figure 9 Motion analysis of cutting device with double four-bar linkage

对四杆机构 I,刀片切削点坐标为:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \times \sin\theta_1 + (l_2 + l_5) \times \sin\theta_2 \\ l_1 \times \cos\theta_1 + (l_2 + l_5) \times \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据图 9 中的几何关系,可得出:

$$\theta_2 = 2\arctan \frac{M \pm \sqrt{M^2 + N^2 - P^2}}{N + P} \quad (2)$$

其中, $M = \sin\theta_1, N = \cos\theta_1 - j_1, P = -j_2 + j_3 \cos\theta_1,$
 $j_1 = l_4/l_1, j_2 = (l_1^2 + l_2^2 - l_3^2 + l_4^2)/2l_1l_2, j_3 = l_4/l_2。$

对四杆机构 II,刀片切削点坐标为:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 74 - x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

根据式(1)~(3)可得出刀片的运动轨迹为一个环形封闭回路,在 Python 软件上按照给定条件进行仿真,计

算出 $l_1、l_2、l_3、l_4、l_5$ 之间的优化比例为 1.0:4.4:3.1:5.4:1.5, θ_3 取 6° 时,得到刀片运动轨迹如图 10 所示,再根据鸡枞菌根部的实际大小确定四连杆机构的尺寸。

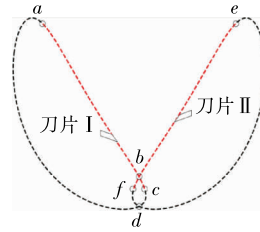


图 10 刀片切削轨迹
Figure 10 Cutting track

由图 10 可知,刀片运动轨迹包括一个直线作业段 $a-b-c$ 、一个弧形的非工作段 $c-d-a$ 。在 $a-b-c$ 直线段,刀片可以模仿人工对鸡枞进行直线切削,同时,非工作段的弧线可以使切屑远离鸡枞根部,避免根部的培养基污染切削后的表面。

鸡枞菌为覆土栽培,可通过图像处理技术精确判断残留黑色培养基的部分为菌根,并根据单个鸡枞菌根部长度计算需深入切削装置的深度,采用定位精度为 0.02 mm 的机械臂精准执行鸡枞菌处理路径,实现精准切削,如图 11 所示。而人工配合切削装置虽然可以实现鸡枞菌锥形削根,但无法精确控制鸡枞菌进入切削区域的深度,可能出现过度切削(部分菇柄被切削)或不完全切削(菇根未完全切削)现象。

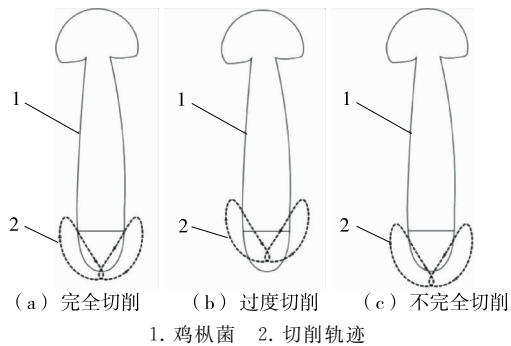
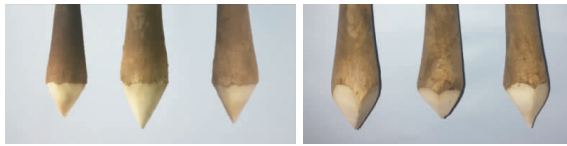


图 11 鸡枞根部切削状态
Figure 11 *Oudemansiella raphanipes* root cutting state

3 试验验证

选取山东烟台和湖南岳阳某菌菇生产基地的新鲜鸡枞菌进行人工与切削装置的比对试验。挑选形状、大小接近的鸡枞菌 240 个,随机分为两组进行试验。由图 12 可知,试验装置切削的鸡枞菌根部呈圆锥形;人工经过 4~8 刀切削,形成 4~8 棱锥。机械臂完成抓取、切削、分级动作耗时 708 s,平均切削速度为 5.9 s/个;手工切削耗时 756 s,平均切削速度为 6.3 s/个。切削装置可 24 h 连续工作,且一人可同时操作 3~5 台设备。

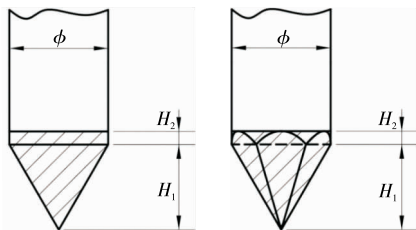


(a) 装置切削 (b) 人工切削

图 12 装置削根与人工削根

Figure 12 Device rooting and manual rooting

为计算根部切削完成后的实际体积,建立如图 13 所示的模型: H_1 为装置削根高度; H_2 为人工削根附加高度,人工切削得到 4~8 棱锥,机器切削得到圆锥。由表 1 可知,机器切削后根部实际体积明显大于人工切削。以菇柄直径为 12 cm 的鸡枞菌为例,对比人工削根形成的 7 棱、6 棱、5 棱和 4 棱锥,试验装置削根可分别减少 7.5%,9.1%,13.9%,24.4%的根部浪费率。



(a) 装置削根 (b) 人工削根

图 13 削根后根部剩余体积

Figure 13 Calculation of residual volume of root after root cutting

表 1 多棱锥与圆锥体积对比表

Table 1 Multi-pyramid and cone volume comparison table

多棱锥	人工削根 体积/mm ³	装置削根 体积/mm ³	体积差/ mm ³	浪费率/ %
4 棱锥	664.5	878.9	214.4	24.4
5 棱锥	756.5	878.9	122.4	13.9
6 棱锥	798.5	878.9	80.4	9.1
7 棱锥	821.7	878.9	66.2	7.5
8 棱锥	836.0	878.9	42.9	4.9

4 结论

通过对多个参数进行建模,设计了工作段为圆锥包裹的切削机构,在摄像头及机械臂辅助下,实现对鸡枞菌菇柄的锥形削根。试验结果表明,以菇柄直径为 12 mm 的鸡枞菌为例,对比人工削根形成的 7 棱、6 棱、5 棱和 4 棱锥,试验装置可分别减少 7.5%,9.1%,13.9%,24.4%的根部浪费率,且速度更快、一致性更好。试验仅对鸡枞菌的锥形切削进行了研究,尚未探讨是否会对鸡枞菌品质造成影响,后续将进一步研究,以验证试验装置的实用性。

参考文献

[1] 魏永生, 侯雅慧, 李佳鑫, 等. ICP-OES 法定性定量分析野生鸡枞菌中的矿质元素组成[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 301-305.

[2] 施渺筱, 李祝, 杨坤耀, 等. 野生鸡枞菌子实体不同部位营养成分分析[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(2): 182-183.

[3] 栗铭鸿, 李官浩, 朴守焕, 等. 鸡枞菌不同溶剂提取物成分分析及抗氧化作用研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 144-148.

[4] 马增俊. 中国农产品批发市场年鉴[M]. 北京: 中国言实出版社, 2018: 275-279.

[5] 王相友, 闫聪聪, 刘战丽. 可食性涂膜对双孢蘑菇生理和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 141-145.

[6] 王相友, 朱继英, 李霞. 双孢蘑菇采后贮藏品质预测模型[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 103-107.

[7] 刘晓, 闫语婷. 香菇的营养价值及综合利用现状与前景[J]. 食品工业, 2017, 38(3): 207-210.

[8] 易建勇, 姜斌, 董鹏, 等. 高静压和热处理对蘑菇多酚氧化酶的钝化动力学分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 136-142.

[9] 刘英, 李建华, 冯谦, 等. 基于食用菌加工的在线检测方法[J]. 农机化研究, 2008, 30(2): 165-168.

[10] 耿宇聪, 张涛, 刘宏斌, 等. 不同压块模式对双孢菇生产的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 275-278.

[11] 秦改娟, 郭亚萍, 张国庆, 等. 秸秆与菇渣堆肥用于双孢蘑菇栽培的理化性状和细菌群落分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 285-291.

[12] 高汉斌, 吕浩杰, 韩现伟, 等. 基于 CCD 传感器的香菇动态去根系统[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(9): 90-92.

[13] 陈红, 夏青, 左婷, 等. 基于纹理分析的香菇品质分选方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 285-292.

[14] 陈建军, 陈勇, 高伟, 等. 平面四杆机构运动精度可靠性分析与数字仿真[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(6): 759-763.

[15] 贾丙西, 刘山, 张凯祥, 等. 机器人视觉伺服研究进展: 视觉系统与控制策略[J]. 自动化学报, 2015, 41(5): 861-873.

[16] 迟颖. 基于 PLC 控制系统的果蔬采摘机械手设计研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 225-229.

[17] 丰焕亭. 机器人手臂自动控制的优化设计与仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(3): 264-267.

[18] PETERSSON A, DAVIS S, GRAY J O, et al. Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(3): 332-338.

[19] HASSAN A, ABOMOHARAM M. Modeling and design optimization of a robot gripper mechanism[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 46: 94-103.

[20] LI Zhi-guo, LI Ping-ping, LIU Ji-zhan. Physical and mechanical properties of tomato fruits as related to robot's harvesting[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(2): 170-178.

[21] 刘继展, 唐善奇, 单帅, 等. 机器人采摘葡萄果穗振动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 1-8.