

猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验^{*}

傅隆生¹ 张发年^{1,2} 槐岛芳德³ 李 桢¹ 王 滨¹ 崔永杰¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016;

3. 宫崎大学农学部, 宫崎 8892192)

摘要: 进行了棚架式栽培模式自然生长条件下簇生猕猴桃无损采摘机器人末端执行器的研究。基于果实与果柄的分离特性, 提出面向机器人的果实采摘方法和简化几何模型, 进行了果实与果柄分离试验的可行性验证; 基于果实采摘方法设计了从底部接近、旋转包络分离毗邻果实并抓取、向上运动分离果实的末端执行器, 并试制样机, 进行了现场评价试验。结果表明, 采摘模型能够实现果实与果柄的分离, 末端执行器解决了毗邻果实分离问题, 能够实现单个果实稳定抓取、无损采摘和采后抓持, 成功率达到 96.0%, 平均单果耗时 22 s。

关键词: 猕猴桃 采摘机器人 无损采摘 末端执行器

中图分类号: S225.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0001-08

Development and Experiment of End-effector for Kiwifruit Harvesting Robot

Fu Longsheng¹ Zhang Fanian^{1,2} Gejima Yoshinori³ Li Zhen¹ Wang Bin¹ Cui Yongjie¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3. Faculty of Agriculture, University of Miyazaki, Miyazaki 8892192, Japan)

Abstract: Fruit nondestructive picking is one of the key technologies of developing harvesting robot. A nondestructive picking end-effector of kiwifruit was studied. Firstly, based on the artificial way of kiwifruit picking and the biology characteristics of kiwifruit stem, a fruit picking method for robot was proposed, which need to separate the fruit from stem and hold the fruit to prevent it dropping. Then, the picking method was verified by a special designed separation test of fruit and its stem. After that, an end-effector was designed and manufactured based on the fruit picking method, which approached a fruit from the bottom, and enveloped and grabbed the fruit from two sides, and then rotated up to separate the fruit from stem. In the end, the performance of end-effector prototype was tested on the most common cultivar ‘Hayward’ at the Meixian Kiwifruit Experimental Station of Northwest A&F University. The results showed that the proposed picking method could separate the fruit successfully with the least force of 1.3 N when the angle between fruit and stem was set as 60°, which is not significantly different from the manual picking of which the angle between fruit and stem is approximately to 90° in normal. The end-effector was tested on 68 samples (28 in the morning, 25 in the noon, and 15 in the night). All of them were successfully picked and held by the end-effector. Among them, two samples were picked with stem which might be caused by the reason of that the fruit is not ripe enough to be harvested. All the picked fruit were free of damage until ripen for eating. In all, the end-effector could effectively solve the problems of separating the adjacent fruits, grab a single fruit with an accuracy of 100%, and pick and hold it nondestructively. The success rate of picking was 96.0% and the average picking time was 22 s.

Key words: Kiwifruit Harvesting robot Nondestructive picking End-effector

收稿日期: 2014-12-10 修回日期: 2015-01-10

^{*} 国家自然科学基金资助项目(61175099)

作者简介: 傅隆生, 讲师, 博士, 主要从事果实的省力化采收和智能化分选研究, E-mail: fulsh@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 崔永杰, 副教授, 博士生导师, 主要从事果蔬生产自动化研究, E-mail: cuiyongjie@nwsuaf.edu.cn

引言

中国是世界上猕猴桃种植面积最大的国家,但目前靠人工采摘,是猕猴桃种植中最费时费力的环节。因此,研究猕猴桃采摘机器人具有重要意义^[1]。

果实无损采摘是采摘机器人的关键技术之一,主要靠采摘机器人末端执行器来保证。不同果蔬的生长特点和采摘要求不同,采摘方式也不同,因此末端执行器的结构形式也存在差异^[2-13]。猕猴桃具有易损伤、后熟、簇生等特点,采摘时为保证不损伤果实需要进行毗邻果实分离,降低夹持力,同时去除果柄。相比苹果、柑橘等冠状树形,猕猴桃属藤蔓植物,采用棚架式栽培模式,具有相对标准的生长环境,果实下垂于藤蔓上,底部空间大,不受枝干、叶、果实等干涉,有利于采摘动作的实施。

陈军等^[7]研究的猕猴桃采摘末端执行器从果实两侧抓持,左右翻转分离果柄,在实验室进行了单果采摘试验,但该装置采摘毗邻果实时易与相邻果实碰撞,抓取空间和抓取力也受影响,且未讨论自然生长条件下簇生猕猴桃果实的采摘问题。Scarfe等^[8]介绍了猕猴桃采摘机器人的基本结构,但未涉及末端执行器的内容。刘继展等^[14]采用真空吸盘吸附的方式研究了毗邻番茄果实的分离,但猕猴桃表面生有绒毛不利于真空吸盘工作。刘继展等^[14]和陈燕等^[15]分别对番茄和荔枝的果柄切断特性进行了研究,从对应果实采摘方法考虑,为采摘方式设计提供了依据。

本文从自然生长条件下猕猴桃簇生等特点出发,基于果实与果柄的分离特性,提出面向机器人的果实无损采摘方法,进行了果柄分离试验的可行性验证;充分利用果实底部空间,采用钳式组合手指设计从果实底部接近、旋转包络分离毗邻果实并抓取的末端执行器,并试制样机进行现场评价试验。

1 果实采摘方法

1.1 果实采摘简化几何模型

猕猴桃成熟时,果柄与果实形成以维管束为主要组织结构的离层。维管束是一种管状空心纤维组织,能承受较强的拉应力,但不易承受剪切力。果实脱落的主要原因是果柄离层受剪切力作用,导致维管束被折断^[16]。末端执行器在抓取果实后以其尺寸为半径旋转,使果柄与果实惯性轴成一定夹角,同时产生对果柄离层的剪切作用折断果柄。果柄与果实惯性轴的夹角越大,剪切效果越明显,果柄分离力越小。人工采摘猕猴桃时动作为:手指抓住果实后,

以果实果柄连接处后为支点,在竖直平面内旋拧果实将果实果柄连接处折断^[7]。利用人手的包容性和手指的多关节保证果实采摘后不掉落。但受目前技术水平的限制,末端执行器难以达到人手的灵活性。因此,末端执行器的设计既要实现果实与树枝的分离,又要保证果实分离后不掉落,且对果实的夹持力不能太大。此外,机器人采摘过程中,末端执行器有固定支点,可实现以末端执行器的尺寸为半径旋转。为此,提出如图1所示果实采摘简化几何模型。末端执行器将果实包住后,通过旋转向上运动,使果柄与果实惯性轴形成一定角度产生剪切力从而使果实与果柄分离,并利用末端执行器的包容性保证果实不掉落。因此,需研究果柄与果实惯性轴夹角及预设末端执行器的旋转角度。

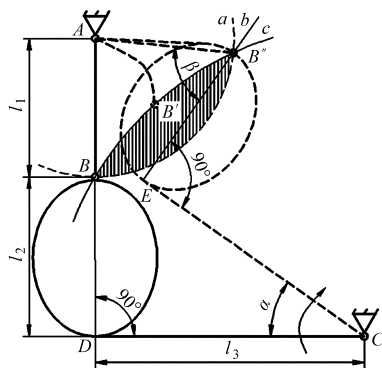


图1 果实采摘简化几何模型

Fig. 1 Geometric model of fruit picking

简化几何模型主要是以末端执行器固定端为支点,在末端执行器抓取果实后,向上旋转牵动果实运动,致使果柄离层处产生剪切力而分离果柄。为简化牵动过程,简化几何模型建立中提出以下假设:①将枝干简化为固定铰链,记作铰链A(果实采摘过程中果柄对枝干产生拉力,枝干也会发生移动,但由于猕猴桃树枝多固定在棚架上,果实成熟期果柄分离力较小,引起枝干移动也小,故可忽略不计)。②果蒂与果柄连接简化为铰链,记作铰链B(由于果实可以实现绕果蒂旋转而不发生断裂,故简化为铰链)。③末端执行器腕部记作铰链C,为末端执行器腕部的转动关节。

如图1所示,AB表示果柄,CD表示末端执行器。虚线圆弧a表示无末端执行器作用时以铰链A为圆心,果柄长为半径,果蒂的运动轨迹。实线圆弧b表示在末端执行器作用下以末端执行器腕部(铰链C)为圆心,末端执行器与果实组成的整体尺寸为半径的果蒂运动轨迹,即果实被末端执行器稳定抓取后在末端执行器作用下的实际运动轨迹。直线c表示果实的惯性轴。2个运动轨迹的右上交点B'',为果柄理论上所能达到的极限位置。

简化几何模型求解中,用直线段 AB'' 代替实际弯曲的果柄。基于以上假设和定义,得到模型公式

$$\alpha = \frac{180^\circ}{\pi} \arctan \frac{l_1 + l_2}{l_3} - \frac{180^\circ}{\pi} \arctan \left(\tan \left(\frac{\pi}{180^\circ} - \arccos \frac{l_1 + l_2}{\sqrt{(l_1 + l_2)^2 + l_3^2}} - \frac{\pi}{180^\circ} \beta \right) \right) \quad (1)$$

$$\beta = \frac{180^\circ}{\pi} \left(\arccos \left(- \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 + l_3^2}} \right) - \arctan \frac{l_3}{l_2} \right) \quad (2)$$

式中 α ——末端执行器最大旋转角度, ($^\circ$)
 β ——果实惯性轴与果柄最大夹角, ($^\circ$)
 l_1 ——果柄长度, mm
 l_2 ——果实长度, mm
 l_3 ——末端执行器长度, mm

公式中 l_1 、 l_2 、 l_3 确定后则末端执行器最大旋转角度 α 以及果柄与果实惯性轴的最大夹角 β 可唯一确定。

通过统计果实大小和长度,设定末端执行器长

度为 120 mm(末端执行器实际设计尺寸),求得的 α 介于 $25^\circ \sim 40^\circ$, 而 β 介于 $47^\circ \sim 60^\circ$ 。

1.2 果柄分离试验

为了验证所提出的采摘方法的可行性,并研究果柄与果实惯性轴成一定角度分离果柄时需要分离力的大小,设计了果柄分离试验。

1.2.1 试验材料与方法

以 2012 年 10 月在西北农林科技大学猕猴桃眉县试验站采摘的 27 个带柄的“海沃德”猕猴桃为样本,并在采摘当天进行试验。检测设备为上海衡翼精密仪器有限公司生产的 HY-0230 型微控电子万能试验机。采用自制夹具(图 2),夹具 1 夹持果柄,夹具 2 夹持果实,与万能试验机配合使用。

根据简化几何模型,果柄分离时果柄与果实惯性轴的极限夹角在 $47^\circ \sim 60^\circ$ 之间,而人工采摘时由于人手的包容性和手指多自由度,在 90° 附近即可实现采摘。为此,选取 3 个水平进行对比试验,分别为 180° 、 90° 、 60° ,角度定义如图 2d 所示。

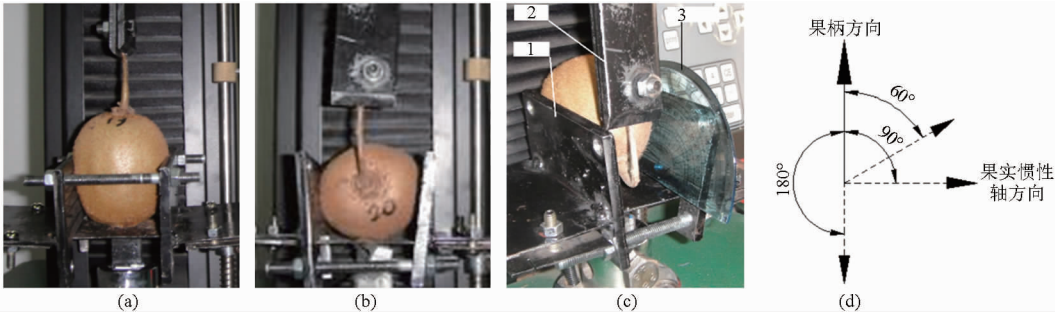


图 2 果柄分离试验

Fig. 2 Detachment test and angle definition of stem and fruit

(a) 180°直拉 (b) 90°侧拉 (c) 60°侧拉 (d) 果柄与果实惯性轴夹角定义

1. 夹具 2 2. 夹具 1 3. 量角器

试验将果实随机分为 3 组,自制夹具分别夹持果实和果柄,利用量角器预设果柄与果实惯性轴的角度(果柄有弯曲)。夹具 2 将果实固定在万能试验机底座上,夹具 1 将果柄固定在万能试验机的可动梁上,根据相对运动,相当于模型中的果实绕铰链 A 运动。万能试验机自动记录果柄脱落时的分离力,结果取每组平均值。

1.2.2 结果与分析

果柄与果实惯性轴成 180° 夹角时,果柄分离力最大,为 12.8 N,成 90° 夹角时居中,为 1.7 N,成 60° 夹角时最小,为 1.3 N。对 3 组试验结果进行单因素方差分析(PASW 18.0),显著水平 p 取 0.05。结果表明(表 1),夹角为 180° 时所需的分离力与夹角为 90° 和 60° 时存在显著性差异;而在 90° 和 60° 夹角时,显著性为 0.75,两者的果实与果柄的分离力不存在显著性差异。

表 1 果实果柄分离试验结果

Tab. 1 Detachment test of stem and fruit

果实与果柄 夹角/($^\circ$)	样本 个数	果实 质量/g	果柄 长/mm	果柄 直径/mm	分离 力/N
180	9	87(10) ^a	48(6) ^a	3.3(0.3) ^a	12.8(4.3) ^a
90	9	90(10) ^a	49(7) ^a	3.5(0.3) ^a	1.7(0.5) ^b
60	9	86(11) ^a	50(5) ^a	3.4(0.2) ^a	1.3(0.5) ^b

注:果实质量、果柄长、果柄直径、分离力数据为均值,括号内为方差;同列的不同字母表示存在显著性差异($p \leq 0.05$),相同字母表示不存在显著性差异。

如前所述,果柄离层以维管束为主要组织结构,能承受较大的拉应力,受剪切力作用时易被折断。 180° 直拉时,维管束主要承受拉应力,果柄分离力较大;夹角为 90° 和 60° 时,维管束主要承受剪切力作用,果柄分离力明显变小。由试验结果可知,夹角为 90° 和 60° 时果柄分离力较小,且不存在明显差异,能够满足机器人果柄分离力的采摘要求。因此,依

据几何模型实现果实采摘的方法具有可行性。

2 末端执行器设计

2.1 总体结构与工作原理

猕猴桃栽培特点是果实底部空间大遮挡少,结合目标果实采摘信息,末端执行器从果实底部更易实现毗邻果实分离与无损采摘^[17]。根据基础试验和简化几何模型,针对猕猴桃的簇生特点,设计了从果实底部接近、仿生手指旋转包络分离毗邻果实并抓取,向上旋转分离果柄的末端执行器。它有3个自由度,主要由接近机构、夹持机构、旋转采摘机构 and 控制系统组成^[18]。其总体结构如图3所示。

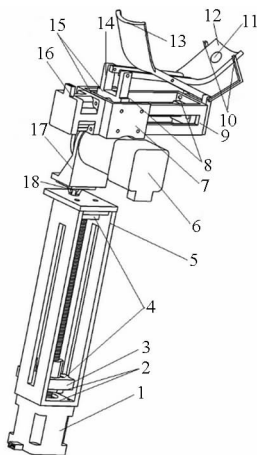


图3 末端执行器结构图

Fig.3 Structure of end-effector

1. 直线步进电动机 I 2. 霍尔传感器 I 3. 滑块 I 4. 霍尔传感器 II 5. 机架 I 6. 减速步进电动机 7. 连接件 II 8. 霍尔传感器 III 9. 机架 II 10. 红外传感器 11. 压力传感器 12. 前手指 13. 后手指 14. 滑块 II 15. 霍尔传感器 IV 16. 直线步进电动机 II 17. 连接件 I 18. 导向板

末端执行器工作原理如下:

(1) 机器视觉获得果实的坐标位置后,机械臂控制末端执行器使末端执行器原点与机器视觉获得的果实坐标原点在同一垂线上。

(2) 在末端执行器接近范围内,末端执行器垂直上升自动接近果实,红外开关传感器检测果实是否进入手指抓取范围,等待抓取。

(3) 果实进入手指抓取范围后,前手指旋转伸入果实毗邻间隙包络分离毗邻果实,同时前后手指合拢抓取果实,前手指中心处的压力传感器检测夹持力大小。

(4) 达到预设夹持力后,旋转采摘机构向上旋转分离果柄,完成采摘动作,电动机复位,释放果实,完成一次采摘。图4所示为末端执行器采摘流程图。

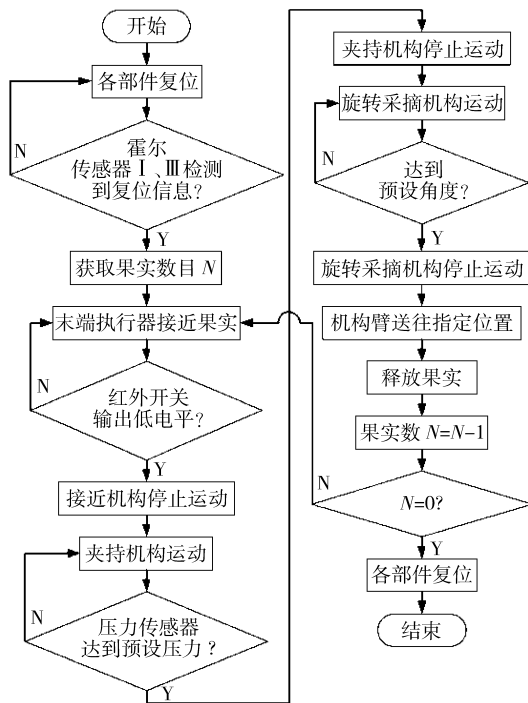


图4 末端执行器采摘流程图

Fig.4 Flow chart of fruit picking by end-effector

2.2 执行机构设计

2.2.1 接近机构设计

接近机构是末端执行器微调部分,由直线步进电动机 I 的丝杠螺母结构、机架 I、滑块 I 和导杆构成。导杆通过滑块 I 与丝杠螺母结构的传动螺母联接,带动夹持机构和旋转采摘机构实现从底部接近果实。由于同簇果实高低分布不超过 100 mm,将接近机构的有效行程设计为 150 mm,即可实现同簇果实一次性采摘。电动机行程安全和复位原点通过安装在机架 I 上的 2 对霍尔传感器实现。

2.2.2 夹持机构设计

由于自然生长条件下猕猴桃多簇生,为实现单个采摘,首先需要完成毗邻果实分离。猕猴桃果实近似椭圆形,相邻果实底部形成人字形毗邻间隙,利用此特点,手指可从果实底部旋转上升伸入毗邻间隙,逐渐包络分离毗邻果实,最后实现前后夹持、抓取。

为此,设计了采用 2 个仿生弧形面手指组成的钳式夹持机构,该机构还包括直线步进电动机 II 的丝杠螺母结构、滑块 II 和机架 II,可同时实现毗邻果实分离和抓取。前手指末端采用销钉与滑块 II 连接,后手指末端采用销钉与机架 II 连接,2 手指之间采用销钉连接。手指开合通过与丝杠螺母结构固联的滑块 II 在机架 II 中滑动实现。该机构可使前手指在抓持过程中前移并旋转上升。手指上升位移和前伸位移理论上越大越好,上升位移越大,果实被包络越多,抓持越稳定,前伸越多越能保证果实在抓持过

程中不脱离手指。但过大的上升位移和前伸位移会导致夹持机构尺寸过大,增大采摘空间,不利于避障,设计中通过 Pro/E 5.0 软件优化,手指长度参数和滑块 II 的高度参数来保证上升位移和前移位移以满足设计要求,图 5 所示为手指结构尺寸,后手指尺寸与前手指仅手指长度不同。直线步进电动机 II 丝杠的有效行程为 100 mm,可实现直径在 40 ~ 60 mm 范围内果实的有效抓取,此时手指可实现 40 ~ 65 mm 的上升高度和 11 ~ 20 mm 前移位移。果实高度平均值为 64.98 mm^[19],40 ~ 65 mm 上升高度大于果实高度的 1/2 以上,而且手指采用曲率半径为 32.5 mm 的仿生弧面,与果实实现面接触,保证了抓持的稳定性。

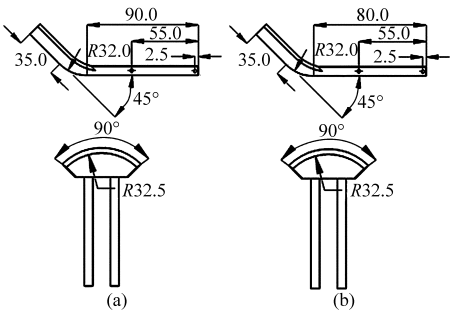


图 5 手指结构尺寸
Fig. 5 Structure and dimension of finger
(a) 前手指尺寸 (b) 后手指尺寸

夹持机构对果实大小的适应性是关键设计参数之一。由文献[19]可知,猕猴桃果实宽度和厚度方向极差分别为 11.3 mm 和 9.1 mm,相比长度方向极差为 15.5 mm,尺寸变化小,而该夹持机构抓持果实时从果实宽度或厚度方向夹持,因此有利于夹持机构对果实大小的适应性,而且夹持机构能够在果实大小变化为 20 mm 内保证稳定抓持。

前手指两侧采用一对对射式红外开关传感器进行果实位置检测,前手指中心位置安装有压力传感器检测手指夹持力。两手指内衬有厚度为 5 mm 与手指仿生弧形面相适应的软硅胶材料,起到缓冲作用,避免手指刚性过大对果实造成损伤。电动机行程安全和复位原点通过安装在机架 II 上的 2 对霍尔传感器实现。

2.2.3 旋转采摘机构设计

旋转采摘机构主要功能是依据简化几何模型实现果实与果柄分离。该机构由安装于腕部的减速步进电动机、连接件 I 和连接件 II 构成。减速步进电动机机体通过连接件 I 与机架 II 固联,减速步进电动机输出轴通过连接件 II 与机架 I 固联,减速步进电动机旋转带动连接件 II 相对连接件 I 转动。减速步进电动机旋转角度通过设定脉冲数实现,电动机

的最大扭矩可达 6 N·m。
为减轻末端执行器质量,前后手指采用 ABS 材料利用 3D 打印技术制成,机架、滑块等除标准件外均采用赛钢制成。为提高末端执行器精度,减小运行误差,与丝杠配合的传动螺母均为消除螺母。

2.3 控制系统设计

2.3.1 控制系统构成

控制系统硬件包括以单片机为核心的控制器、红外开关传感器、霍尔传感器、压力传感器等传感器以及电动机驱动器,软件采用 C 语言编程。控制系统由 2 个电源模块供电,传感器、单片机及电动机驱动器控制信号电压为 5 V,步进电动机驱动器驱动电压为 24 V。整个控制系统采用末端控制原理,由单片机获取传感器数据,处理后控制步进电动机驱动器的方向信号、脉冲数和脉冲频率实现对末端执行器动作的有序控制。图 6 所示为控制系统结构图。

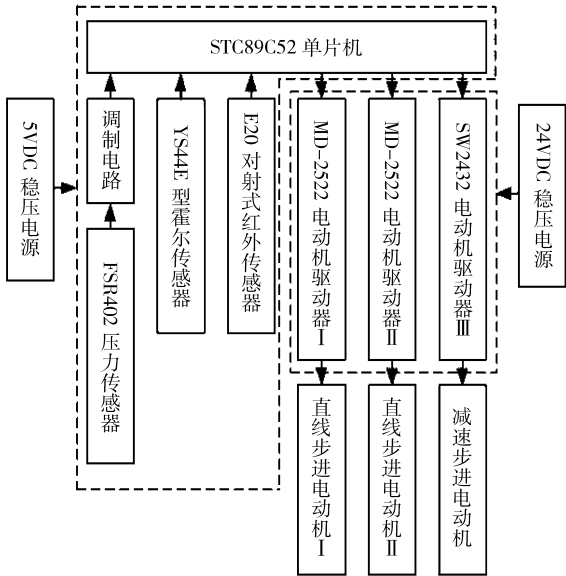


图 6 控制系统结构图
Fig. 6 Structure of control system

红外开关传感器(广州戈龙电子,E20 型)安装在机架 I 上,当手指处于复位状态时对称分布在前手指两侧且与指端相距 10 mm。红外开关传感器作为末端执行器原点与果实识别点(果实的最低点花萼所在位置)相匹配,距离指端的尺寸是影响毗邻果实分离的因素之一。当其安装在指端时手指在抓持果实时会顶起果实而导致抓持失败,相反与指端距离越远手指伸入果实底部越多,果实越容易被手指包络并抓取,但手指伸入过多会碰撞后方毗邻果实,试验确定了距指端 10 ~ 15 mm 时可有效分离毗邻果实却不干涉后边毗邻果实。

压力传感器(美国 Interlink Electronics 公司,

FSR402 型)安装在前手指内侧中心位置。压力传感器的信号采用 ADC0832 芯片转换为数字信号传输给单片机,采用静力加载标定法对压力检测系统进行了标定。夹紧力大小采用与阈值电压比较的方法进行控制,其设定阈值电压为 2.5 V,对应夹紧力为 2.7 N。

为防止电动机超程,同时作为电动机复位原点,在机架 I、II 两端共安装有 4 对霍尔位置传感器(天津越尔兴电子科技,YS44E 型),对应滑块 I、II 背面安装磁钢。

直线步进电动机 I、II 选自日本山社电机公司,型号分别为 17E2035B4 和 14E2035AA4,电动机驱动器型号均为 MD-2522,电动机细分数设置为 400,分别完成接近动作和抓持动作。直线步进电动机 I 和直线步进电动机 II 在设定速率 5.1~30.5 mm/s 范围内,可实现推力在 75 N 以上。果柄分离动作由减速步进电动机(日本泽野,SW1720N10A 型)完成,减速比为 30,电动机的最大扭矩可达 6 N·m,驱动器型号为 SW2432。

2.3.2 压力测试系统标定

为实现果实的无损采摘,采用 FSR402 型压力传感器检测末端执行器手指夹紧力大小。采用静力加载标定法对压力检测系统进行了标定,试验采用 50~1 000 g 砝码对 FSR402 压力传感器进行加载,加载量间隔为 50 g,重复 5 次,结果取平均值。最终得到不同加载量与输出电压的关系如图 7 所示,图中公式为后续果实采摘过程的受力分析提供了依据。

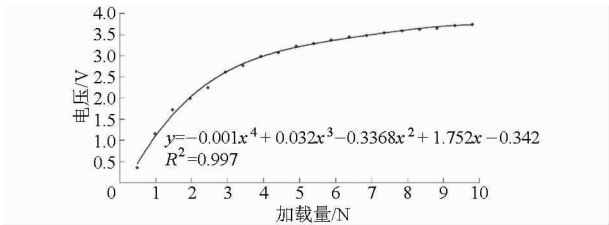


图 7 电压与加载量的关系

Fig. 7 Relation between voltage and load

3 采摘试验

3.1 试验材料与方法

采摘试验于 2013 年 10 月在西北农林科技大学眉县猕猴桃试验站进行。试验利用高度可调的三脚架代替机械臂固定末端执行器,通过激光辅助手动使末端执行器原点(2 个红外传感器中心位置)与果实花萼(果实中心点)在同一垂直线上,然后由末端执行器自行完成接近、抓取、分离果柄和释放果实等动作。

试验选择簇生果实为主要采摘对象,按照时间段分为 3 组,分别是早上、中午和晚上。采摘果实数共计 68 个,其中早上 28 个,中午 25 个,晚上 15 个。根据几何模型,试验设置末端执行器旋转角度为 60°。

为观察末端执行器从抓持果实到采摘完成过程中,果柄运动变化过程和果实的受力特性,试验时降低直线步进电动机 II 和减速步进电动机速率,利用串口通信以计算机作为上位机获取手指中压力传感器的数值。图 8 所示为果实采摘过程。

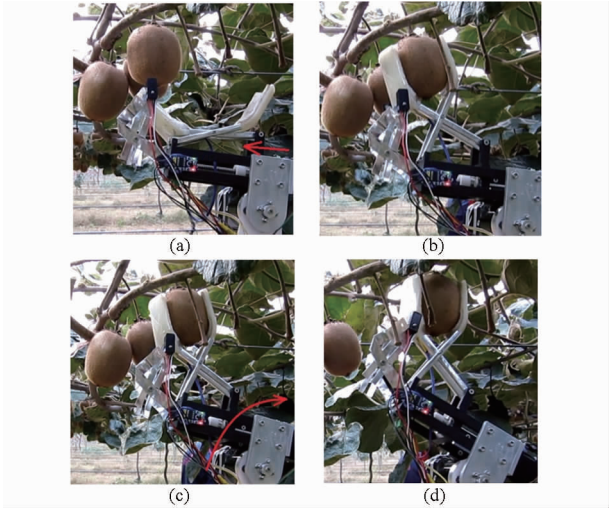


图 8 采摘过程

Fig. 8 Fruit picking process

(a) 开始抓持 (b) 抓持完成 (c) 开始旋转 (d) 采摘完成

3.2 结果与分析

3.2.1 果实采摘过程受力分析

图 9 所示为果实采摘过程的力学特性曲线。由图中可知,整个采摘过程可分为 3 个阶段:首先是抓持过程,随着手指的合拢压力逐渐增大。达到预设压力后,进入第 2 阶段即果柄折断过程,此时由于果柄先处于松弛阶段然后逐渐受拉力作用,因此压力在预设压力附近先波动后增大,这与简化几何模型中果柄的运动过程一致。果柄分离瞬间果蒂达到了所能承受的最大剪切力果柄与果实分离,进入后抓持过程,即第 3 阶段,后抓持过程压力在预定压力附近较小范围波动说明压力传感器工作正常。很明显,曲线的变化过程与实际理论相符。果柄在分离瞬间,曲线出现明显波动,据此选择适当阈值,判断果柄与果实分离,实现智能化控制。

表 2 统计分析了果实样本采摘过程的受力。峰值压力和预设压力通过压力传感器标定公式求取。表中压力差即为分离果柄过程中对果实产生的附加压力,对应图 9 中果柄折断瞬间压力变化,其最大值为 3.7 N,最小值为 0.7 N,平均值为 1.9 N。压力大小不同可能与果实成熟度有关,果实在成熟期果蒂

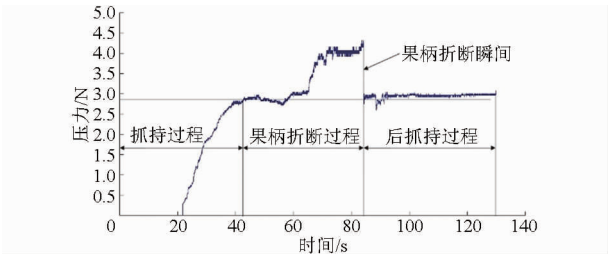


图 9 果实采摘过程力学特性曲线

Fig. 9 Mechanical properties of fruit picking process

离层易被折断, 相对应压力小。基础研究中采用曲率半径 52 mm、表面积 800 mm² 的弧形压头进行了果实损伤阈值力研究, 发现压力小于 15 N 时果实未出现损伤, 对应压强为 18.8 kPa^[19]。由于压力传感器有效面积为 507 mm² (直径 13 mm), 可求得设定压力 2.7 N 对应压强 5.4 kPa, 采摘中果实最大受力为 6.4 N 对应压强 12.5 kPa, 均小于果实损伤阈值压强 18.8 kPa。因此, 保证了果实的无损采摘要求, 而且果实样本带回实验室直到可食也未出现腐坏。

表 2 果实样本受力统计分析

Tab. 2 Stress of partial fruit samples N

项目	设定压力	峰值压力	压力差
最大值	2.7	6.4	3.7
最小值	2.7	3.4	0.7
平均值	2.7	4.6	1.9
标准差	0	0.2	0.2

3.2.2 采摘效果

图 10 所示为果实样本的采摘效果。图 10a 为从果实底部拍摄的目标样本, 果实簇生, 相邻之间有毗邻间隙。末端执行器利用此毗邻间隙成功实现了毗邻果实的分离, 毗邻果实分离成功率 100%。图 10b 中果柄脱落干净, 果蒂部分可明显看到构成果柄离层的维管束组织, 其组织如前所述呈束状分布在果柄周围。

图 10c 为采摘带果柄样本, 即认为采摘失败样本。带果柄的可能原因是果实存在差异, 部分果实

未成熟, 对于未成熟果实果柄分离所需分离力较大。加之果柄长度、果实大小不同, 可能导致末端执行器旋转分离果柄时与果实惯性轴的夹角不同, 若末端执行器抓持果实后与果实惯性轴夹角较大时, 作用过程中果柄离层处受拉力作用而非剪切力, 增大果柄分离力。

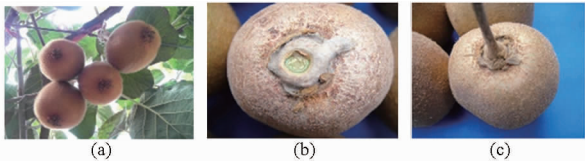


图 10 采摘效果

Fig. 10 Picking result

(a) 目标样本 (b) 成功采摘样本 (c) 带果柄样本

试验总计采摘了 68 个样本, 带果柄 2 个, 其中早上和中午各 1 个。采摘成功率中午最低, 为 96.0%, 单果平均耗时 22 s。由于不同时间段出现失败果实数少, 可能存在偶然因素, 暂不能说明采摘时间与采摘失败存在联系。

4 结论

(1) 提出了一种面向机器人的自然生长条件下簇生猕猴桃果实的无损采摘方法, 经试验验证该方法具有可行性。

(2) 设计了一种从果实底部接近、旋转包络分离毗邻果实并抓取的末端执行器, 采用末端执行器向上旋转方式分离果柄, 有效解决了毗邻果实分离和无损采摘的问题。

(3) 通过现场评价试验, 该末端执行器对毗邻果实的分离成功率 100%, 采摘成功率在 96.0% 以上, 单果平均耗时 22 s。

(4) 果实带果柄原因是果实存在成熟度的差异, 未成熟果实所需果柄分离力较大, 末端执行器与果实惯性轴夹角较大时不利于果柄离层折断。下一步将结合机器视觉和机械臂进行系统试验。

参 考 文 献

1 崔永杰, 苏帅, 王霞霞, 等. 基于机器视觉的自然环境中猕猴桃识别与特征提取[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 247 - 252.
Cui Yongjie, Su Shuai, Wang Xiaxia, et al. Recognition and feature extraction of kiwifruit in natural environment based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 247 - 252. (in Chinese)
2 李秦川, 胡挺, 武传宇, 等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 175 - 179.
Li Qinchuan, Hu Ting, Wu Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 175 - 179. (in Chinese)
3 Zhao Dean, Lü Jidong, Ji Wei, et al. Design and control of an apple harvesting robot[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112 - 122.
4 Bulanon D M, Kataoka T. Fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of Fuji apples[J]. Agricultural Engineering International: CIGR E-journal, 2010, 12(1): 203 - 210.

- 5 张凯良, 杨丽, 张铁中. 草莓收获机器人采摘执行机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9):155 – 161.
Zhang Kailiang, Yang Li, Zhang Tiezhong. Design and experiment of picking mechanism for strawberry harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):155 – 161. (in Chinese)
- 6 顾宝兴, 姬长英, 王海青, 等. 智能移动水果采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6):153 – 160.
Gu Baoxing, Ji Changying, Wang Haiqing, et al. Design and experiment of intelligent mobile fruit picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):153 – 160. (in Chinese)
- 7 陈军, 王虎, 蒋浩然, 等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10):151 – 154. (in Chinese)
- 8 Scarfe A J, Flemmer R C, Bakker H H, et al. Development of an autonomous kiwifruit picking robot[C] // Proceedings of 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents, ICARA 2009, 2009:380 – 384.
- 9 刘继展, 李萍萍, 李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3):109 – 112.
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo. Hardware design of the end-effector for tomato harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):109 – 112. (in Chinese)
- 10 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.
Liu Jizhan, Li Pingping, Ni Qi, et al. Test of the vacuum suction device for tomato harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10):170 – 173,184 (in Chinese)
- 11 杨庆华, 金寅德, 钱少明, 等. 基于气动柔性驱动器的苹果采摘末端执行器研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9):154 – 158.
Yang Qinghua, Jin Yinde, Qian Shaoming, et al. Research on end-effector of apple picking based on new flexible pneumatic actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9):154 – 158. (in Chinese)
- 12 鲍官军, 张水波, 陈亮, 等. 基于气动柔性驱动器的球果采摘末端抓持器[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5):242 – 246.
Bao Guanjun, Zhang Shuibao, Chen Liang, et al. Design of spherical fruit end-grasper based on FPA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):242 – 246. (in Chinese)
- 13 叶敏, 邹湘军, 蔡沛锋, 等. 水果采摘机器人通用夹持机构设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊):177 – 180.
Ye Min, Zou Xiangjun, Cai Peifeng, et al. Clamping mechanism of fruits harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):177 – 180. (in Chinese)
- 14 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 tomatoes for robotic harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12):66 – 70. (in Chinese)
- 15 陈燕, 蔡伟亮, 向和平, 等. 面向机器人采摘的荔枝果梗力学特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21):53 – 58.
Chen Yan, Cai Weiliang, Xiang Heping, et al. Mechanical properties of litchi stem for harvesting robots[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21):53 – 58. (in Chinese)
- 16 陈发河, 于新, 张维一. 无核白葡萄果柄结构与落粒关系的研究[J]. 新疆农业大学学报, 2000, 23(1):44 – 48.
Chen Fahe, Yu Xin, Zhang Weiyi. Study on relationship between pedicel structure and berry abscission of ‘Xinjiang Wuhebai’ grape cultivar [J]. Transactions of Xinjiang Agricultural University, 2000, 23(1):44 – 48. (in Chinese)
- 17 Su Shuai, Fu Longsheng, Zhang Fanian, et al. Image acquisition method of kiwifruit picking robot[C] // Third International Conference on Control, Automation and Systems Engineering, 2013: 9 – 12.
- 18 西北农林科技大学. 一种猕猴桃果实采摘末端执行器:中国, 201320479472.0[P]. 2013 – 08 – 07.
- 19 张发年, 李桢, 王滨, 等. 猕猴桃果实物理参数与损伤因素的研究[J]. 农机化研究, 2014(11):141 – 145.
Zhang Fanian, Li Zhen, Wang Bin, et al. Study on kiwifruit physical parameters and damage factors[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(11):141 – 145. (in Chinese)