

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.027

猕猴桃采摘机器人末端执行器设计*

陈军 王虎 蒋浩然 高浩 雷王利 党革荣

(西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】为实现猕猴桃的自动化采摘,设计了猕猴桃采摘机器人末端执行器。测定了猕猴桃抗压特性和其他相关物理特性,提出了一种机器采摘方案,设计了末端执行器的机械装置、感知系统和控制系统。试验结果表明,该末端执行器对猕猴桃的抓持成功率为100%,采摘成功率为90%,完成一次采摘动作耗时9 s。

关键词: 猕猴桃 采摘机器人 末端执行器 设计

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)10-0151-04

Design of End-effector for Kiwifruit Harvesting Robot

Chen Jun Wang Hu Jiang Haoran Gao Hao Lei Wangli Dang Gerong

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

Abstract

An end-effector for harvesting kiwifruit was developed. The compressibility properties and other related physical properties of the kiwifruit were measured. The body structure, perception system and control system of the end-effector were designed. The experiment of kiwifruit picking was finally conducted. The results showed that the success ratio of clamping and picking kiwifruit reached to 100% and 90%, respectively. Picking time of 9 s was needed to perform one action of harvesting.

Key words: Kiwifruit, Harvesting robot, End-effector, Design

引言

末端执行器作为采摘机器人的核心部件之一,安装于机械手臂前端,是机器人接触果实的重要工作部件,其工作对象的大小和形状一般不相同,且具有柔软、易损坏等特性,因此采摘机器人末端执行器的设计非常重要^[1~3]。

日本、荷兰、美国等国学者针对采摘机器人末端执行器做了大量研究工作,而国内在末端执行器方面的研究起步较晚,以番茄、苹果、黄瓜等果实为采摘对象研究开发了多种末端执行器。但目前采摘果实运用的方法主要为拉、拧果实,或者在检测到果柄位姿后用激光、刀片等辅助工具切割果柄,这些方法容易损坏果实表面,同时刀片的使用容易使果实之间传染疾病^[4~14]。

本文在研究猕猴桃物理特性的基础上,设计一

种运用旋拧的方法采摘猕猴桃的末端执行器,研制其机械装置、感知系统和控制系统,并进行采摘试验。

1 猕猴桃物理特性

1.1 试验条件

为使设计的末端执行器能正确采摘猕猴桃,设计之前需对猕猴桃的相关物理特性进行测定,包括猕猴桃扭转采摘试验和猕猴桃抗压特性试验。

杨凌周边猕猴桃成熟期一般为9月下旬至10月上旬,试验材料均于10月上旬采自杨凌周边猕猴桃园,品种为海沃德,猕猴桃质量为100~140 g,果柄长度为43~65 mm,果实直径为40~50 mm。

1.2 扭转采摘试验

研究发现:猕猴桃果实与果柄连接处最易断裂。人工采摘猕猴桃动作为手指抓住猕猴桃果实后,以

收稿日期: 2012-04-12 修回日期: 2012-05-22

* 公益性行业(农业)科研专项资金资助项目(201203016)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(QN2009041)

作者简介: 陈军,教授,博士生导师,主要从事智能化农业装备研究,E-mail: chenjun_jdxy@nwsuaf.edu.cn

猕猴桃果实果柄连接处为支点,在竖直平面旋拧果实将果实果柄连接处折断。本文所设计的末端执行器采摘猕猴桃动作模拟人手操作步骤。

扭转采摘试验在猕猴桃园内进行,时间为 10 月上旬,主要设备有自制夹具、测力计(浙江艾力 NK-10 型,最大量程为 10 N,分度值为 0.05 N)。夹具设计为凹槽状,模拟人手采摘动作,从果树的正面靠近猕猴桃,将树上的果实按其自然生长位置放入夹具凹槽内,夹紧果实。通过在竖直平面用测力计带动夹具旋转,从而折断猕猴桃果实果柄连接处,观察果柄断裂时测力计的值,以及猕猴桃旋转过的角度,并通过计算得到采摘该猕猴桃所需的扭矩。试验结果如表 1 所示。

表 1 猕猴桃扭转采摘试验数据

Tab.1 Harvesting torque force and angle of kiwifruit

序号	质量/g	扭力/N	扭矩/N·m	扭转角度/(°)
1	138	5.95	1.35	46.0
2	131	5.45	1.24	61.1
3	134	3.90	0.89	55.0
4	141	4.00	0.91	64.0
5	112	4.90	1.11	60.0
6	126	2.66	0.60	73.6
7	121	7.20	1.63	70.1
8	158	6.10	1.38	56.9
9	142	5.75	1.31	37.6
10	120	2.95	0.67	64.0
11	125	7.46	1.69	64.1
12	139	5.72	1.30	76.3

试验结果可看出,样本中折断果柄所需最大扭矩为 7.46 N,考虑夹具旋转过程中会产生摩擦力,实际扭力应当小于此值。测量夹具旋转的圆弧直径为 227 mm,果柄折断时果实转过的角度均小于 90°。因此认为末端执行器夹持住果实后,提供 1.7 N·m 的力矩且使果实旋转过 90°便可成功采摘猕猴桃。

1.3 抗压特性试验

抗压特性试验在实验室进行,试验对象为成熟期 1 h 内采摘的猕猴桃,设备采用上海衡翼精密仪器有限公司的 HY-0230 型微机控制电子万能材料试验机,精度为 ±5%,最大负荷为 2 000 N,由计算机自动控制力的加载与卸载,并自动完成数据采集。随机选取 10 个猕猴桃样本,将猕猴桃短径夹在试验机的底板与加载板之间,加载力设定为 20 N,速度设定为 10 mm/min。抗压特性曲线从压缩量 0.3 mm 开始记录,可在一定程度消除变形初始阶段由于加载板与果实表皮接触不稳造成的非线性误差。猕猴桃

所承受加载力 F 与压缩量 D 之间的特性曲线如图 1 所示。

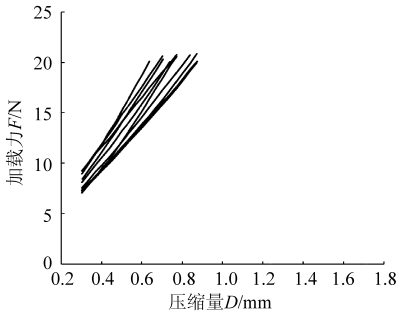


图 1 猕猴桃抗压特性曲线

Fig.1 Compressibility characteristic curves of kiwifruit

由图 1 可以看出,在 20 N 加载力作用下,测试曲线均未出现屈服点,计算每条曲线加载力和压缩量之间的皮尔逊相关系数值(Pearson correlation)均在 0.999 之上,即二者基本呈线性关系,由此证明猕猴桃的形变仍在弹性变化范围内。试验结束后,观察猕猴桃表面无压痕。将其放置两周,与同一批采摘、未做过压缩试验的猕猴桃各抽取 5 个,再次做抗压特性试验,试验结果如图 2 所示。观察发现,两类果实的抗压特性曲线并无显著区别。试验后切开猕猴桃,观察加载表面仍未出现颜色变化或伤痕。因此可认为:20 N 的加载力不会对猕猴桃造成损伤。

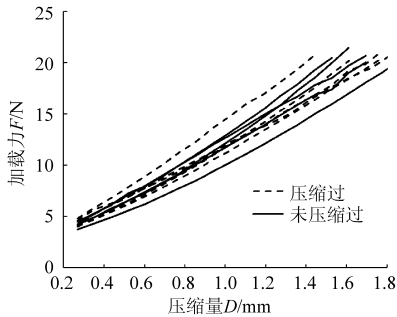


图 2 采摘两周后猕猴桃抗压特性曲线

Fig.2 Compressibility characteristic curves of kiwifruit after two weeks

2 主体结构及原理

末端执行器设计为 3 个自由度,分别为手指的靠近与远离,手指的打开与闭合以及末端执行器整体的旋转。根据果实大小设计末端执行器的行程:可向前伸长 110 mm,夹持短径直径为 30~80 mm 的猕猴桃。末端执行器主体结构如图 3 所示。

为减轻整体的质量,末端执行器的手指、内壳、外壳和套筒等非标准件均采用铝合金材料。手指采用两指夹持式,抓持部位内侧设计为圆弧面形状,圆弧面可以校正部分夹持误差。圆弧面内侧贴有厚度为 5 mm 的软硅橡胶,既能增大猕猴桃与手指之间

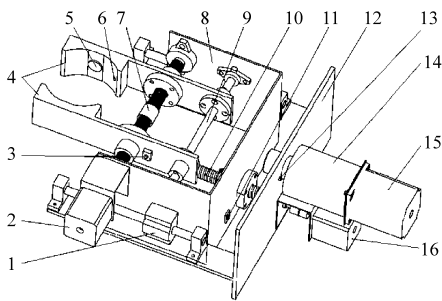


图 3 猕猴桃采摘机器人末端执行器主体结构示意图

Fig. 3 Body structure diagram of end-effector for kiwifruit harvesting robot

1. 导轨滑块组合 2. 步进电动机 I 3、11、13. 霍尔接近传感器
4. 手指 5. 压力传感器 6. 红外位置开关 7. 左右旋丝杠副
8. 内壳 9. 撑杆 10. 滚珠丝杠副 12. 外壳 14. 套筒组合
15. 步进电动机 III 16. 步进电动机 II

的摩擦力,又能对夹持果实时所施加的力起到一定的缓冲作用,减少夹持对果实造成的伤害。

通过 3 组霍尔接近传感器分别检测末端执行器 3 个自由度的传动机构是否处于初始位置,驱动步进电动机对末端执行器进行复位。通过滚珠丝杠副驱动末端执行器手指靠近猕猴桃,安装在手指上的红外位置开关检测猕猴桃位置信息。通过左、右旋丝杠副驱动末端执行器手指夹持猕猴桃,安装在手指中间的一对压力传感器检测夹持力,夹持力大小能够使果实被可靠夹持又不受到损伤。步进电动机 III 通过联轴器带动末端执行器整体在竖直平面先逆时针旋转 90°,再顺时针旋转 90°,旋拧采摘果实。完成上述动作后,机械臂带着末端执行器移动到收获装置上方,将采摘好的猕猴桃落入到收获装置,结束采摘。末端执行器采摘作业流程如图 4 所示。

3 感知控制系统

末端执行器上安装的传感器有红外位置开关、压力传感器和霍尔接近传感器。根据采摘果实的作业要求,控制系统需检测感知系统信息并进一步控制执行系统工作,因此控制部分采用了单片机系统,选用 MCS-51 系列的 AT89S52 芯片,软件采用 C 语言编程。控制系统硬件结构如图 5 所示。

红外位置开关由红外发射电路和红外接收电路组成,555 定时器产生 38 kHz 脉冲信号,由红外发光二极管发射红外脉冲信号, HS0038B 型红外一体接收头接收红外信号并转换成 TTL 电平信号输出给单片机。压力传感器选用美国 Interlink Electronics 公司生产的 FSR402 型电阻式压力传感器(适用于 0.1~10 kg 范围)。通过 LM393 型电压比较器分配电压,从而设定压力传感器的触发力。当压力传感器所承受的挤压力大于触发力时,电平发生改变。

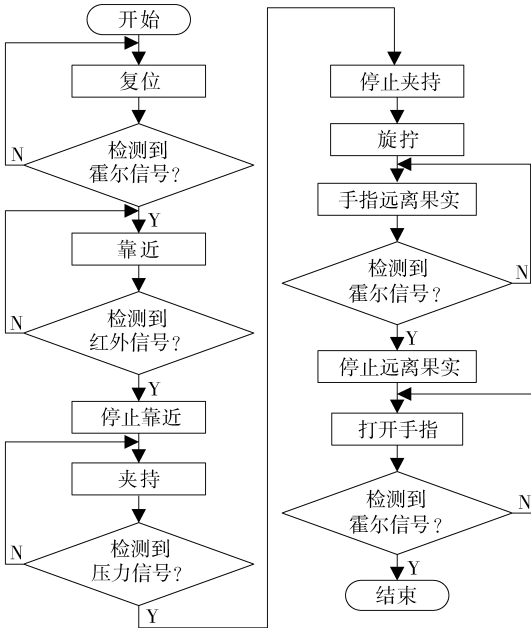


图 4 末端执行器采摘作业流程图

Fig. 4 Flow chart of harvesting operation for end-effector

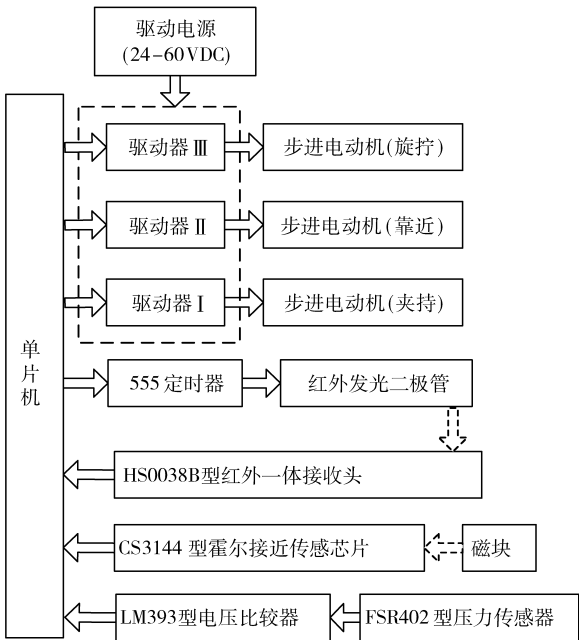


图 5 末端执行器控制系统硬件结构图

Fig. 5 Hardware structure of control system for end-effector

霍尔接近传感器应用霍尔效应原理,磁块靠近 CS3144 型霍尔传感芯片时,电平信号发生改变,检测距离为 (8 ± 0.05) mm。步进电动机及配套驱动器均采自深圳雷塞科技公司,其中靠近和夹持所需的步进电动机 I 和 II 型号均选用 42HS03,其最大转矩为 $0.44 \text{ N}\cdot\text{m}$,配套驱动器型号为 DM320C。旋拧动作所需步进电动机 III 型号选用 57HS22,其最大转矩为 $2.2 \text{ N}\cdot\text{m}$,配套驱动器型号选用 DM442。步进电动机驱动器通过单片机输出的脉冲数量、脉冲频

率和方向信号来精确控制步进电动机行程、速度和方向。

4 猕猴桃采摘试验与分析

在实验室搭建平台对末端执行器进行采摘试验。铁丝网高 1.5 m, 将猕猴桃果实吊在铁丝网下面, 为保证实验室固定猕猴桃的铁丝网平台不晃动, 用线扣绳子将果柄的一端固定在搭好的铁丝网上, 使其不能在铁丝上滑动。试验时将末端执行器置于悬挂好的猕猴桃果实前, 完成一次猕猴桃采摘动作, 如图 6 所示。

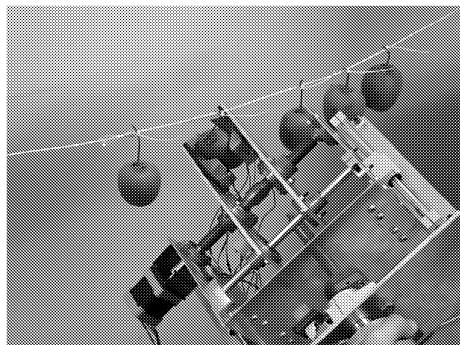


图 6 末端执行器采摘照片

Fig. 6 Harvesting scene with end-effector

末端执行器共进行了 20 次猕猴桃采摘试验。夹持成功 20 个, 夹持成功率为 100%。传感器工作

正常, 夹持位置准确, 垫层的圆弧面能包裹住果实, 并校正部分夹持误差。夹持力设定为 10 N 可满足可靠夹持, 试验时未发生夹持损伤或果实脱落现象。采摘成功 18 个, 失败 2 个, 采摘成功率为 90%。设计的末端执行器整体旋转最大角度为 90° , 通过测量单片机驱动电动机时发出的脉冲数可计算果实旋转的角度。失败的 2 个样本都是在果实旋转过 90° 之后果柄仍未断裂, 分析主要原因是这 2 个样本的果柄韧性较大, 因此连接处不易被折断, 18 个采摘成功样本中果实旋转的平均角度为 66.3° , 最大角度为 78° , 最小角度为 52° 。

5 结论

(1) 基于人工采摘猕猴桃的原理, 设计了猕猴桃采摘机器人末端执行器。

(2) 进行了相关的物理特性试验。通过末端执行器在竖直平面旋拧的方法采摘果实, 测出采摘果实所需扭矩应小于 $1.7 \text{ N} \cdot \text{m}$, 果柄折断时果实旋转的角度小于 90° 。猕猴桃抗压特性较好, 加载 20 N 的力没有对果实造成损伤。

(3) 在实验室进行了采摘试验, 预先设定的夹持力可完全可靠夹持住猕猴桃, 夹持成功率为 100%, 采摘成功率为 90%, 采摘时间为 9 s。

参 考 文 献

- Naoshi K, Koki Y, Michihisa I, 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.
- 汤修映, 张铁中. 果蔬收获机器人研究综述[J]. 机器人, 2005, 27(1): 90~96.
Tang Xiuying, Zhang Tiezhong. Robotics for fruit and vegetable harvesting: a review [J]. Robot, 2005, 27(1): 90~96. (in Chinese)
- 近藤直, 门田充司, 野口伸. 农业机器人: II. 机构和事例[M]. 孙明, 李民赞, 译. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- van Henten E J, van Tuijl B A J, Hoogakker G J, et al. An autonomous robot for de-leafing cucumber plants grown in a high-wire cultivation system [J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(3): 317~323.
- Shigehiko H, Kenta S, Satoshi Y, et al. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 160~171.
- Johan B, Kevin D, Sven B, et al. Autonomous fruit picking machine a robotic apple harvester[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Field and Service Robotics, Chamonix, 2007.
- Scarfe A J, Flemmer R C, Bakker H H, et al. Development of an autonomous kiwifruit picking robot[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents, Wellington, 2009:380~384.
- Monta M, Naoshi K, Kanae T. End-effectors for tomato harvesting robot [J]. Artificial Intelligence Review, 1998, 12(1~3): 181~184.
- Kanae T, Tateshi F, Akira A, et al. Cherry-harvesting robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 65~72.
- Zhao Dean, Lü Jidong, Ji Wei, et al. Design and control of an apple harvesting robot [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112~122.

7 王海泉,朱继强. 微量元素与植物生长调节剂配合对马铃薯生理指标及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学,2005(5): 19~20.
Wang Haiquan,Zhu Jiqiang. The effect of microelement and plant growing regulator on the physiological characteristics and yield of potato[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2005 (5):19~20. (in Chinese)

8 雷桅,王双明,孙敏. Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} 对植物生理特性影响的比较分析[J]. 广西植物,2007,27(5): 770~774.
Lei Wei, Wang Shuangming, Sun Min. Comparative analysis on effect of Fe^{2+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} to physiological characteristics of plant[J]. Guihaia, 2007,27(5): 770~774. (in Chinese)

9 杜长玉,高明旭. 不同微肥在马铃薯上应用效果的研究[J]. 中国马铃薯,1999,13(3): 141~144.
Du Changyu,Gao Mingxu. Study on the effects of trace element applied on potatoes[J]. Chinese Potato, 1999,13(3): 141~144. (in Chinese)

10 韦建玉,金亚波,杨启港,等. 植物铁营养研究进展:铁运输与铁有关的分子生物学基础[J]. 安徽农业科学,2007, 35(33): 10 589~10 595.
Wei Jianyu,Jin Yabo,Yang Qigang, et al. Research advances in iron nutrition of plants: iron transports and the relevant molecular biology basis of iron[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007,35(33): 10 589~10 595. (in Chinese)

11 王静钢,李寿如,高晶,等. 不同营养液的使用对马铃薯原原种生产的影响[J]. 中国马铃薯, 2007,21(1):24~25.
Wang Jinggang,Li Shouru,Gao Jing, et al. The effects on produce of potato minituber through applying the different kinds of nutrient solution[J]. Chinese Potato, 2007,21(1):24~25. (in Chinese)

12 陈永波,赵清华. 微量元素缺乏及过量对脱毒马铃薯苗生长的影响[J]. 中国马铃薯,2005,19(1):10~12.
Chen Yongbo, Zhao Qinghua. Effect of deficiency or excessiveness of microelements on growth of virus-free potato plants [J]. Chinese Potato, 2005,19(1):10~12. (in Chinese)

13 王素梅. 雾培脱毒马铃薯适宜营养液配方和浓度的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2004.
Wang Sumei. Studies on optimum prescription and concentration of nutrient solution on virus-free minituber production by aeroponic cultivation[D]. Taian:Shandong Agricultural University, 2004. (in Chinese)



(上接第 154 页)

11 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)

12 钱少明,杨庆华,王志恒,等. 黄瓜抓持特性与末端采摘执行器研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 107~112.
Qian Shaoming, Yang Qinghua, Wang Zhiheng, et al. Research on holding characteristics of cucumber and end-effector of cucumber picking [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 107~112. (in Chinese)

13 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)

14 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): 175~184.
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): 175~184. (in Chinese)



(上接第 189 页)

18 Mallat S. Recursive interferometric representation[C] //Proc. of EUSICO Conference, Denmark, IEEE Press, 2010.

19 Yann Lecun, Kavukvuoglu K, Farabet C. Convolutional networks and applications in vision [C] //Proc. of ISCAS 2010, Paris, France, IEEE Press, 2010.

20 王晓明,冯鑫,党建武. 一种局部监督式纹理分类算法[J]. 兰州理工大学学报,2012,12(3):128~134.
Wang Xiaoming, Feng Xin, Dang Jianwu. A local supervised texture classification algorithm [J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2012, 12(3):128~134. (in Chinese)

21 Zhang D, Lu G. Content-based image retrieval using Gabor texture features[C] //Proc. of First IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia (PCM00), Sydney, Australia, 2000.

22 Kokare M, Biswas P K, Chatterji B N. Rotation-invariant texture image retrieval using rotated complex wavelet filters[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 2006, 36(6):1 273~1 282.