

季钦杰, 卢伟, 宋爱国, 等. 水果尺寸在线测量的智能柔性手爪设计[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 455-462.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.02.028

水果尺寸在线测量的智能柔性手爪设计

季钦杰^{1,2}, 卢伟^{1,2}, 宋爱国³, 王鹏^{1,2}, 丁宇^{1,2}, 王玲^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031; 2. 江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 江苏 南京 210031; 3. 东南大学仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对目前水果自动化分级中手爪普遍缺少抓取力和水果尺寸信息而感知能力不足的问题, 设计一种具有抓取力和水果尺寸原位动态检测功能的柔性手爪。首先, 设计一种基于单气道多腔体结构的智能柔性三指手爪, 其中一根手指通过悬臂梁力传感器竖直安装于手掌上用于检测力触觉, 一根手指内嵌柔性弯曲度传感器用于检测手指的弯曲度, 另一根手指直接固装于手掌上; 设计力觉传感器和弯曲度传感器调理电路, 并分别进行标定。其次, 提出基于力觉传感器和弯曲度传感器融合的水果尺寸原位测量方法, 推导基于手指弯曲度的水果尺寸测量公式, 并通过有限元分析和试验进行验证。有限元仿真结果表明, 基于手指弯曲度的水果直径测量误差小于5%; 通过分别对不同直径(15 mm, 25 mm, 35 mm, 45 mm)的3D打印圆柱和水果(杏子、冬枣、红提和龙眼等)进行抓取试验, 表明力觉信号第一次突变时刻(手指刚接触到圆柱时)的手指弯曲度可用于被抓物直径的精确测量, 误差小于5%。基于柔性手爪的力觉传感器和弯曲度传感器信息融合进行水果尺寸的在线快速测量是可行的。

关键词: 力触觉; 弯曲度; 柔性手爪; 原位测量; 柔性机器人

中图分类号: S225; TP241

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2020)02-0455-08

Design of an intelligent soft gripper for on-line measurement of fruit size

Ji Qin-jie^{1,2}, LU Wei^{1,2}, SONG Ai-guo³, WANG Peng^{1,2}, DING Yu^{1,2}, WANG Ling^{1,2}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2. Jiangsu Province Engineering Laboratory of Modern Facility Agriculture Technology and Equipment, Nanjing 210031, China; 3. College of Instrumental Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: For improving the shortcomings of the existed gripper without grasping force and fruit size detection in fruit grading system, an intelligent soft gripper which could measure grasping force and fruit size on-line dynamically was developed. Firstly, an intelligent flexible three-finger gripper based on the multi-cavity structure and single airway in each finger was developed. One finger was vertically installed on the palm through a cantilever beam force sensor to detect the tactile sense, one finger was embedded with a flexible curvature sensor to detect the curvature of the finger, and the other finger was installed on the palm directly. Moreover, the conditioning circuits of force sensor and bending sensor were developed and calibrated, respectively. Sec-

ondly, an in-situ measurement method of fruit size based on the fusion of the force sensor and curvature sensor was proposed. In addition, the fruit size measurement formula based on finger curvature was derived and verified by the finite element analysis experiment and fruit picking experiment. The simulation results of finite element showed that the fruit diameter detection error based on finger curvature was less than 5%. The grasping experiments on 3D-printed cylinders (15 mm, 25 mm, 35 mm, 45 mm) and different fruits (apri-

收稿日期: 2019-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(11604154); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20181315); 江苏省农机三新工程项目(SZ120170036); Asia Hub 南京农业大学-密歇根州立大学联合研究项目(2017-AH-11); 扬州市重点研发计划项目(现代农业)(YZ2018038)

作者简介: 季钦杰(1998-), 男, 浙江台州人, 本科, 研究方向为机器人传感与控制技术。(E-mail) jiqinjie_njaurobot@163.com

通讯作者: 卢伟, (E-mail) njaurobot@njau.edu.cn

cot, jujube, grape and longan, etc.) indicated that the finger curvature at the moment of the first mutation of force signal (the fingers just touched the object) could be used to accurately measure the diameter of the object with an error of less than 5%. It's feasible to quickly measure the fruit size online based on the fusion information of force sensor and bending sensor.

Key words: haptic; curvature; soft gripper; in-situ measurement; soft robot

水果含有丰富的维生素、膳食纤维等营养物质,是健康饮食必不可少的食物^[1],中国的水果产量连续蝉联世界首位,但目前水果采摘仍然完全依靠人工,是水果生产中最耗时、费力的环节^[2]。为实现水果采摘机械化,国内外学者做了大量研究,开发出如柑橘^[3]、樱桃^[4]、番茄^[5]、苹果^[6]等采摘机器人,但少有投入实际使用。主要问题之一是缺少适用于农业采摘的末端执行器,吸盘等专用执行器通用性差、灵活性低、抓取力小,而刚性的多指灵巧手则容易对质地柔软的果蔬造成损伤^[7],此外,其昂贵的价格也阻碍了其在农业中的应用。

相比刚性机械手,欠驱动的柔性手爪在水果采摘方面具有天然优势,驱动简单^[8],有无限自由度^[9-10],可根据水果形状贴合变形^[11-12],自适应抓取^[13-14]。如 Toshiba 灵巧手^[15]、基于 FPA 的多指灵巧手^[16]、仿生搬运助手^[17]、气动网络柔性手^[18-20]、纤维增强结构柔性手^[21-23]等。有些柔性手被应用于柑橘^[24]、草莓^[25]等农作物采摘。这些柔性手爪是通过特殊的结构实现抓取多样性,但不能感知抓取状态信息,因此缺少准确的力度或位置控制。

为实现柔性手爪感知信息,有学者将导电材料封入硅胶以实现电信号转换,如将碳纳米管复合材料^[26]、eGaIn 液态金属^[27]注入柔性手爪底面形成特殊图案^[28-29]以检测柔性手爪弯曲时的应力,但这种方法检测信息单一而且实现过程相当繁琐,需要带有凹槽的模具,然后从模具的一侧注入材料而另一侧抽真空。为降低柔性手爪的制作成本,提高信息感知多样化,将现有的传感器直接嵌入手爪内部,如嵌入柔性传感器利用先验知识检测碰触^[30],基于触觉反馈重建灯泡三维模型^[31],以及嵌装弯曲度和触觉传感器提高抓取的可靠性^[32],利用 TOF 距离传感器实现变速抓取^[33],将嵌入霍尔传感器的柔性驱动器放置于特定磁场中以测量手指曲率^[34],但多数传感器为刚性结构,直接影响柔性手爪动作。

针对目前水果采摘和分拣中柔性手爪普遍缺少力度、位置信息感知的不足,本研究拟设计一种具有力触觉和手指弯曲度信息动态感知的柔性手爪,可

用于水果采摘机器人和水果分级自动化流水线。

1 试验设计与测量方法

1.1 柔性手爪设计

1.1.1 总体结构设计 柔性手爪如图 1 所示,具有 3 根柔性手指,柔性手指一面为壁厚较薄的波纹管状指节,另一面为较厚的底板,充气时波纹管状指节形变远大于底板从而使得柔性手指向底板侧弯曲。其中第一根手指通过竖直安装的悬臂梁式力觉传感器固装于手掌上,第二根柔性手指内嵌入弯曲度传感器且直接固装到手掌上,第 3 根手指直接固装到手掌上,且 3 根手指圆周等距安装。3 根手指分别通过气管连接到四通快接头的其中一个接口,剩余一个接口作为总接口连接到外部驱动气源。

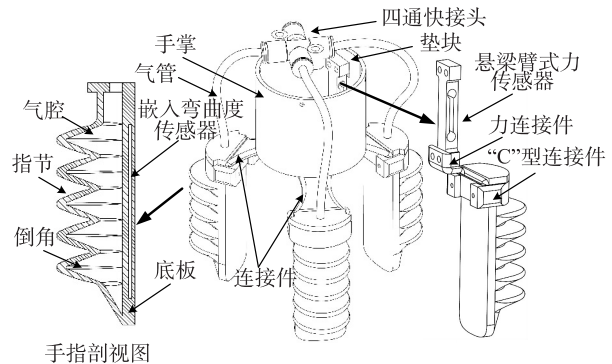


图 1 柔性手爪装配图

Fig.1 Assembly drawing of soft gripper

1.1.2 柔性手爪传感设计 柔性手指是利用 3D 打印的模具由硅胶 (Smooth-On, Inc) 浇注而成,制作一根嵌入弯曲度传感器的柔性手指和 2 根不嵌入传感器的柔性手指,3 根柔性手指通过连接件固装于手掌上组成三指柔性手爪。

采用的弯曲度传感器为 Flex2.2,该传感器自然状态下电阻约为 190 K Ω ,当向金属侧弯曲时电阻值随弯曲程度增大而大幅度减小,最小值约为 40 K Ω ,灵敏度高;当向另一侧弯曲时电阻值小幅度增大,最大值约为 220 K Ω ,灵敏度较低,因此将弯曲度传感器金属侧面向手指底板外部,非金属侧面向手爪内

部腔体嵌入手指底板内,这样可准确检测柔性手爪抓取动作时的弯曲度。该弯曲度传感器柔软可弯曲,对柔性手爪的动作影响甚微。

柔性手爪在气压驱动下自身形变而产生抓取力,能自适应贴合物体表面,因此柔性手爪在抓取物体时的受力点、受力方向、接触面积等因素很大程度上由被抓物体的几何形状所决定,这直接导致柔性手爪的抓力难以准确测量。目前常用的力传感器有薄膜式和应变片式2种,薄膜式力传感器要求测量过程中薄膜不能弯曲、受力方向垂直于薄膜表面,否则会产生较大误差甚至无法检测力的大小,这不适用于产生大形变、抓力方向随被抓物体形状变化的柔性手爪。本研究选用的应变片式力传感器为悬臂梁结构,采用竖直安装的方式通过检测水平力来估测手爪抓力,测量结果基本不受传感器和手爪自身重力的影响。

1.2 传感器调理电路设计及标定

1.2.1 弯曲度传感器

1.2.1.1 弯曲度传感器调理电路 弯曲度传感器R4与电阻R1、电阻R2、电位器R3组成单臂桥电路,调节电位器R3使得电桥初始输出为零,随后经过两级放大电路和T型滤波电路将弯曲度传感器的阻值变化信号放大、滤波后输出,如图2所示。

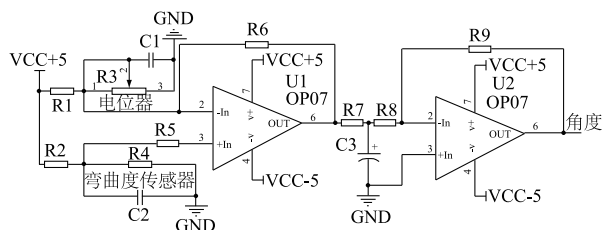


图2 弯曲度调理电路

Fig.2 Conditioning circuit for curvature sensor

1.2.1.2 弯曲度传感器标定 如图3所示,柔性手指竖直固定,定义指尖和指根的连线与竖直方向的夹角(α)为手指的弯曲度。

气压(P)从5 kPa开始以1 kPa为步长逐渐增大至30 kPa,记录相应的气压(P),调理电路输出电压值(V_a)和手指弯曲角度(α),结果如图4所示。

柔性手指的弯曲度(α)和弯曲度传感器输出电压(V_a)均与气压 P 呈线性关系,气压与弯曲度、电压的线性拟合 R^2 分别为0.986、0.997,数学表达式如公式(1)、(2)所示。

$$\alpha = 1.351P + 9.288 \quad (1)$$

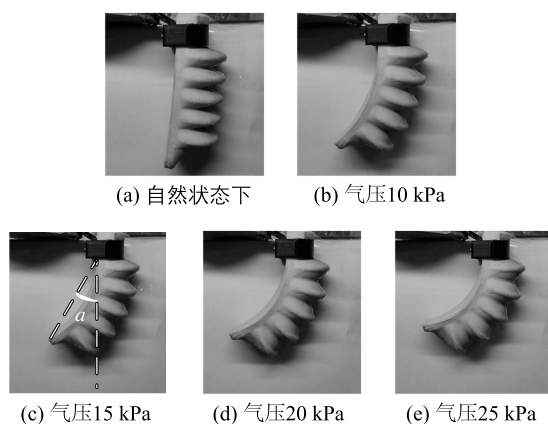


图3 柔性手指在不同气压下的弯曲度

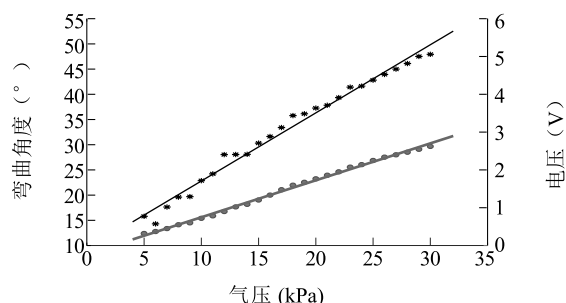
Fig.3 Curvature of soft finger under different pressure

$$V_a = 0.098P - 0.229 \quad (2)$$

其中,当气压较小时柔性手爪弯曲度较小,易受到手指自身质量、环境振动干扰以及人为因素影响造成测量角度误差较大,当气压超过13 kPa时误差明显减小。

由公式(1)和公式(2)可推导出手指空载时弯曲度传感器输出电压与角度的线性关系为:

$$\alpha = 13.786V_a + 12.445 \quad (3)$$



* 弯曲角度; — 弯曲角度的线性拟合直线;
● 弯曲度传感器的输出电压; — 电压的线性拟合直线

图4 手指弯曲角度和输出电压与气压的关系

Fig.4 The relationship between pressure and finger angle, output voltage

1.2.2 力觉传感器

1.2.2.1 力觉传感器调理电路 力传感器量程为5 N,供电电压为5 V,全桥差分输出,经仪用放大器AD620差分放大和OP07调零、调满度后输出力觉电压信号(V_f),如图5所示。

1.2.2.2 力觉传感器标定 将力传感器水平放置,一端固定,另一端悬空并通过细线悬挂不同质量的砝码,分别记录砝码的质量(W)和相应的力觉调理电路输出电压值(V_f)。标定结果如图6所示,悬臂

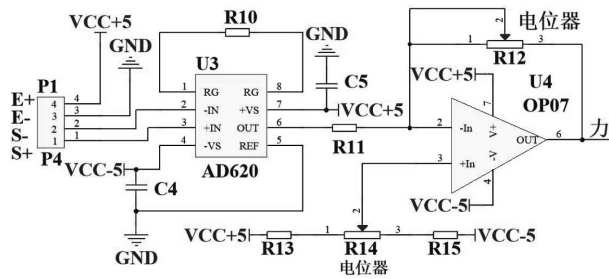


图5 力觉传感器调理电路

Fig.5 Conditioning circuit for force sensor

梁式力觉传感器线性度较好,线性拟合的 $R^2=1$,输出电压与负载压力的数学表达式如公式(4)所示。

$$W = 1.2 V_t \quad (4)$$

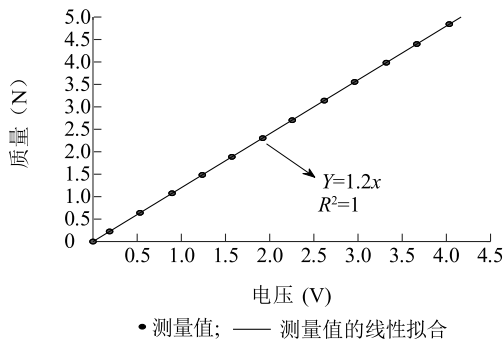


图6 力觉传感器输出电压与负载的关系

Fig.6 The relationship between the output voltage and load of force sensor

1.3 基于力触感和弯曲度的水果尺寸测量

1.3.1 测量原理 柔性手爪抓取水果时,气压从初始值逐渐增大到刚好接触到物体,此时气压是由物体的最大直径(φ)决定的。融合力觉信号和弯曲度信号,可获取柔性手爪恰好碰触到水果时的弯曲度,从而计算出水果的尺寸。本研究仅讨论形状近似为球体的水果。

如图7所示,柔性手指被气压正向驱动时,波纹管状指节形变远大于底板,因此,为简化计算,假设底板长度(L)在形变前后不变。柔性手指初始状态竖直向下,如竖线AC所示,在正压驱动下弯曲如曲线 \widehat{AB} 所示,将曲线 \widehat{AB} 近似为一段圆弧 \widehat{AB} 。由于柔性手指竖直固定,所以竖线AC是圆弧 \widehat{AB} 的切线,过A点做AC的垂线AO,连接AB并做线段AB的垂直平分线DO交直线AO于O点。根据上文定义,可得 $\angle BAC=\alpha$,为柔性手指的弯曲度,易得 $\angle DOA=\alpha$, $AB=2R\sin\alpha$ 。柔性手指指尖在手掌径向的进给量

$\Delta d = 2R(\sin\alpha)^2$,基于假设柔性手指底板长度不变,可得 $\widehat{AB}=\widehat{AC}=L$,即 $2R\alpha \frac{\pi}{180}=L$,可进一步得:

$$\Delta d = \frac{180}{\pi\alpha} L (\sin\alpha)^2 \quad (5)$$

被抓物体外围最大直径 φ 则为:

$$\varphi = 2\left(\frac{\Phi}{2} - \Delta d\right) \quad (6)$$

式中 Φ :3根手指所围内切圆的直径。

因为柔性手爪在测量时的弯曲度约为 $15^\circ \sim 30^\circ$,为简化计算,令 $\alpha \frac{\pi}{180} = \sin\alpha$,可推出被抓物体直径(φ)为:

$$\varphi = 2\left(\frac{\Phi}{2} - L\sin\alpha\right) \quad (7)$$

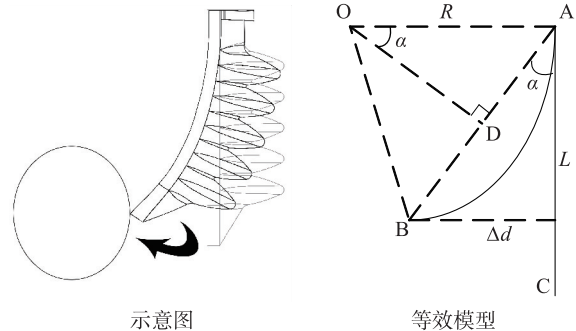


图7 手爪前向弯曲示意图

Fig.7 Schematic diagram of forward-leaning gripper

1.3.2 有限元仿真 为验证公式推导中以圆弧近似手指弯曲、手指底面长度不变、正弦值简化计算的合理性,在ANSYS中仿真测量并计算出测量值与实际值进行对比。

柔性手爪的材料为超弹性体,目前多采用Ogden、Yeoh、Mooney-Rivlin、Arrude-Boyce 4种模型^[35]。本试验采用拉伸机(CMT6104 万能试验机)测量硅胶的单轴拉伸曲线,经对比发现Yeoh二阶模型最符合实际的应力应变曲线,其应变能函数为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_2 - 3)^2 \quad (9)$$

式中, I_1 :第一偏应变常量, I_2 :第二偏应变常量, C_{10} 、 C_{20} :材料特征参数。

经拟合得 $C_{10} = 0.174\ 340\ \text{MPa}$, $C_{20} = 0.012\ 403\ \text{MPa}$,应力应变曲线如图8所示,其中粗线为试验测得的拉伸数据,其余3条分为拟合得出的单轴、双轴、剪切应力应变曲线。

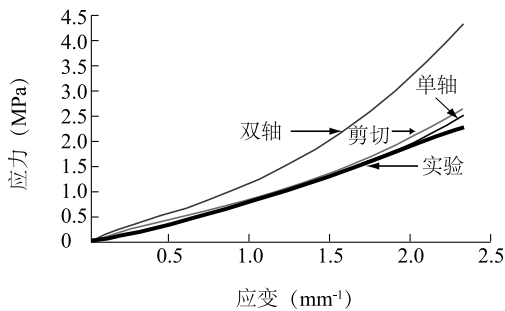


图8 硅胶的应变与应力关系

Fig.8 The relationship between strain and stress of silicon rubber

因为柔性手爪抓取类球形水果时3根手指的弯曲度基本一致,因此仅需仿真单根手指与水果的一个侧面的接触。采用SolidWorks绘制标准直径(D)为35 mm、40 mm、45 mm、50 mm、55 mm、60 mm的半球体代替水果,按照柔性手爪实际尺寸设置半球横截平面与手爪底面的距离为柔性手指圆周分布直径(Φ)的一半,当手指指尖恰好碰触到水果时结束仿真,并测量出弯曲度。仿真中需适当调整水果与手爪的纵向相对位置,以使得手指弯曲后指尖刚好触碰到水果最大直径处,在后续水果直径测量试验中也据此进行。

测得实际参数 $\Phi=84$ mm, $L=63$ mm, 带入公式(7)可推算出被抓水果的最大直径 φ :

$$\varphi = 84 - 126 \sin \alpha \quad (10)$$

仿真测量如图9所示,水果直径的测量值与实际值如表1所示,总体误差小于5%,表明所提的测量方法合理。

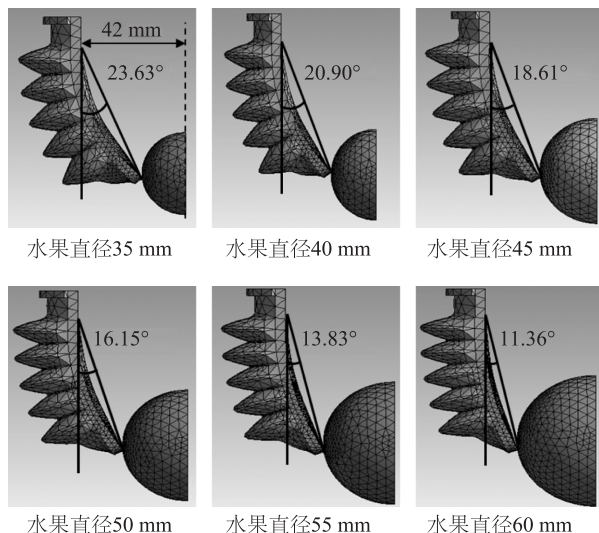


图9 水果直径测量仿真图

Fig.9 Simulation diagram of fruit diameter

表1 水果直径测量仿真结果

Table 1 Simulation results of fruit diameter

| 直径 (mm) | α (°) | φ (mm) | 误差 (%) |
|---------|--------------|----------------|--------|
| 35 | 23.63 | 33.50 | 4.29 |
| 40 | 20.90 | 39.05 | 2.38 |
| 45 | 18.61 | 43.80 | 2.67 |
| 50 | 16.15 | 48.95 | 2.10 |
| 55 | 13.83 | 53.88 | 2.04 |
| 60 | 11.36 | 59.18 | 1.37 |

2 结果与分析

2.1 标准圆柱薄壳直径测量

利用直径为15 mm、25 mm、35 mm、45 mm的3D打印圆柱薄壳作为标准件检测柔性手爪测量直径的精度。为避免弯曲度传感器零漂造成测量误差,采用动态零点校准方法,即每次测量初始,先检测零点时的初始电压(V_{a0})进行动态零点校准,再测量弯曲后的角度传感器电压(V_a),输出手指弯曲度 α 如公式(11)所示。

$$\alpha = k_a (V_a - V_{a0}) + \alpha_0 \quad (11)$$

式中, α_0 为初始弯曲度。

根据图4得 $\alpha_0 = 15.79^\circ$, 根据公式(3)得 $k_a = 13.768$, 将 α 带入公式(10)中推导出被抓水果的最大直径(φ)为:

$$\varphi = 84 - 126 \sin [13.768 \times (V_a - V_{a0}) + 15.79] \quad (12)$$

试验中,柔性手爪初始气压 $P_0 = 5$ kPa, 以100 ms为时间间隔、0.5 kPa为步长递增气压,记录开始测量时刻弯曲度传感器初始电压(V_{a0})和力觉信号第一次突变时刻的弯曲度传感器电压(V_a),利用公式(12)推算出直径,结果如表2所示,测量误差小于5%。

表2 圆柱薄壳的直径测量结果

Table 2 Diameter measurement results based on bending sensor

| 直径 (mm) | V_{a0} (V) | V_a (V) | φ (mm) | 误差 (%) |
|---------|--------------|-----------|----------------|--------|
| 15 | 0.986 | 2.276 | 14.36 | 4.27 |
| 25 | 0.910 | 1.778 | 25.35 | 1.40 |
| 35 | 1.014 | 1.477 | 35.91 | 2.60 |
| 45 | 0.924 | 1.116 | 44.16 | 1.87 |

V_{a0} :开始测量时刻弯曲度传感器初始电压; V_a :力觉信号第一次突变时刻弯曲度传感器电压; φ :测量直径。

2.2 水果尺寸测量

从某超市购买大小不一的杏子、冬枣、红提、龙眼、桃等水果。考虑到水果实际上并非标准的球

体而为椭球体,因此分别测量其长轴和短轴长度。为进一步提高直径测量的准确度,测量水果直径前先用直径(D_{cy})=35 mm 的标准圆柱薄壳对柔性手爪进行偏差校准,相当于输出调零的作用,其校准偏差(e_c)为:

$$e_c = \varphi_{cy} - D_{cy} \quad (13)$$

φ_{cy} :柔性手爪测量获得的圆柱薄壳的直径。

因此,经过偏差校准后的直径(φ_c)为:

$$\varphi_c = \varphi - e_c \quad (14)$$

试验方法同测量圆柱薄壳直径,记录力觉信号和弯曲度信号,如图 10 所示。随着气压阶跃递增,

弯曲度信号也发生阶跃增加,其中弯曲度信号在阶跃增加时先减小后增大,减小是由气压控制设备(SMC 电气比例阀,ITV1050-312L)的工作特性决定。力觉信号第一次阶跃突变时柔性手爪恰好接触到物体,之后力觉信号随着气压阶跃增加而阶跃增加,可以看出力觉信号的动态响应较好。考虑到弯曲度传感器的响应时间,在力觉信号第二次突变前采集弯曲度信号以保证弯曲度信号有足够的时间到达稳态。利用公式(13)得到校准偏差(e_c)并将其带入公式(12)、(14),即可计算得到所测水果的直径,具体测量数据及结果如表 3 所示。

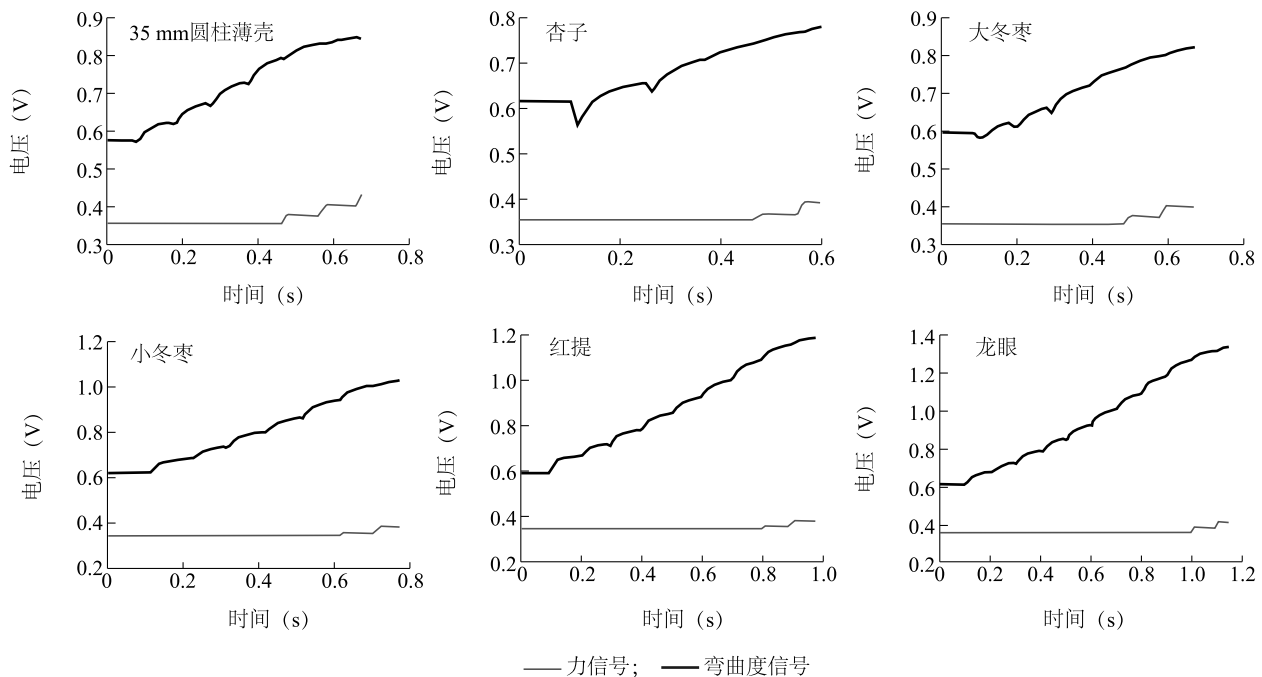


图 10 水果直径测量中力和弯曲度信号

Fig.10 Force and angle signals in fruit diameter measurement

表 3 水果直径测量结果

Table 3 Measurement results of fruit diameter

| 物体 | 长轴 (mm) | 短轴 (mm) | 水果直径 测定值 (mm) | V_{a0} (V) | V_a (V) |
|----------|------------|------------|------------------|-----------------|-----------|
| 35 mm 圆柱 | 35.00 | 35.00 | 35.00 | 0.574 | 0.832 |
| 杏子 | 37.87 | 37.01 | 38.05 | 0.617 | 0.768 |
| 大冬枣 | 35.38 | 34.80 | 36.54 | 0.597 | 0.801 |
| 小冬枣 | 31.07 | 29.07 | 31.41 | 0.623 | 1.007 |
| 红提 | 27.44 | 27.01 | 27.13 | 0.591 | 1.169 |
| 龙眼 | 23.68 | 21.98 | 22.56 | 0.613 | 1.315 |

V_{a0} 、 V_a 见表 2 注。

如图 11 所示,测量值(φ_c)与长轴、短轴接近,

误差小于 5%。其中误差的一部分原因是由于水果为椭球体,3 根柔性手指不一定能同时接触到水果,即当力触觉指示手爪已经接触到物体时,感知弯曲度信号的柔性手指可能还未接触到水果。此外,进一步缩短气压增进的步长也可以减小误差。

3 结论

为实现在柔性手爪抓取水果的过程中直接测量水果直径,本研究设计一种可感知力触觉、弯曲度的柔性手爪,并假设柔性手爪以圆弧状弯曲、弯曲过程中底板长度不变从而推算出水果直径测量公式。由

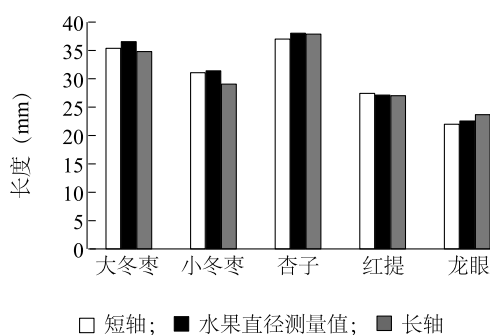


图 11 水果直径测量值与短轴和长轴值对比

Fig.11 Comparison of measured fruit diameter with the length of short and long axes

于柔性手爪为超弹性体,运动过程复杂,因此通过有限元仿真分析验证了假设的合理性。对标准直径的圆柱和不同直径的水果进行抓取试验,结果表明,测量误差小于5%,可满足娇嫩易损的类球形水果直径的在线、快速、无损检测,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 徐丽明,张铁中. 果蔬果实收获机器人的研究现状及关键问题和对策[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 38-42.
- [2] 王丽丽,郭艳玲,王 迪,等. 果蔬采摘机器人研究综述[J]. 林业机械与木工设备, 2009, 37(1): 10-11, 14.
- [3] 卢 伟,宋爱国,蔡健荣,等. 柑橘采摘机器人结构设计及运动学算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(1): 95-100.
- [4] TANIGAKI K, FUJIURA T, AKASE A, et al. Cherry-harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 65-72.
- [5] KONDO N, YATA K, HIDA 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.
- [6] BAETEN J, DONNÉ K, BOEDRIJ S, et al. Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester[C]//Alexander Zelmsky. Field and service robotics. Berlin: Springer, 2008: 531-539.
- [7] 张立彬,杨庆华,胥 芳,等. 机器人多指灵巧手及其驱动系统研究的现状[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 271-275.
- [8] BROWN E, RODENBERG N, AMEND J, et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(44): 18809-18814.
- [9] TRIVEDI D, RAHN C D, KIER W M, et al. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2008, 5(3): 99-117.
- [10] SAUNDERS F, GOLDEN E, WHITE R D, et al. Experimental verification of soft-robot gaits evolved using a lumped dynamic model[J]. Robotica, 2011, 29(6): 823-830.
- [11] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2011, 50(8): 1890-1895.
- [12] LUO M, AGHELI M, ONAL C D. Theoretical modeling and experimental analysis of a pressure-operated soft robotic snake[J]. Soft Robotics, 2014, 1(2): 136-146.
- [13] DOLLAR A M, HOWE R D. The highly adaptive SDM hand: design and performance evaluation[J]. The International Journal of Robotics Research, 2010, 29(5): 585-597.
- [14] DEIMEL R, BROCK O. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping[J]. The International Journal of Robotics Research, 2016, 35(1/3): 161-185.
- [15] SUZUMORI K, IIKURA S, TANAKA H. Applying a flexible microactuator to robotic mechanisms[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1992, 12(1): 21-27.
- [16] 王志恒. 基于 FPA 的新型气动机器人多指灵巧手研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.
- [17] ROLF M, STEIL J J. Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the Bionic Handling Assistant[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012: 3440-3446.
- [18] POLYGERINOS P, LYNE S, WANG Z, et al. Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2013 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013: 1512-1517.
- [19] HAO Y, GONG Z, XIE Z, et al. Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2016 35th chinese control conference (CCC). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016: 6109-6114.
- [20] MOSADEGH B, POLYGERINOS P, KEPLINGER C, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(15): 2163-2170.
- [21] GALLOWAY K C, BECKER K P, PHILLIPS B, et al. Soft robotic grippers for biological sampling on deep reefs[J]. Soft Robotics, 2016, 3(1): 23-33.
- [22] GALLOWAY K C, POLYGERINOS P, WALSH C J, et al. Mechanically programmable bend radius for fiber-reinforced soft actuators[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2013 16th international conference on advanced robotics (ICAR). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013: 1-6.
- [23] DEIMEL R, BROCK O. A compliant hand based on a novel pneumatic actuator[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013: 2047-2053.
- [24] MUSCATO G, PRESTIFILIPPO M, ABBATE N, et al. A prototype of an orange picking robot: past history, the new robot and

- experimental results[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2005, 32(2): 128-138.
- [25] 彭 艳,刘勇敢,杨 扬,等. 软体机械手爪在果蔬采摘中的应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(9): 11-20.
- [26] ZHU M, WANG Z, HIRAI S, et al. Design and fabrication of a soft-bodied gripper with integrated curvature sensors[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2017 24th international conference on mechatronics and machine vision in practice (M2VIP). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017: 1-6.
- [27] PARK Y L, CHEN B R, WOOD R J. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(8): 2711-2718.
- [28] BILODEAU R A, WHITE E L, KRAMER R K. Monolithic fabrication of sensors and actuators in a soft robotic gripper[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015: 2324-2329.
- [29] MORROW J, SHIN H S, PHILLIPS-GRAFFLIN C, et al. Improving soft pneumatic actuator fingers through integration of soft sensors, position and force control, and rigid fingernails[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016: 5024-5031.
- [30] ELGENEIDY K, NEUMANN G, PEARSON S, et al. Contact detection and size estimation using a modular soft gripper with embedded flex sensors[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2018 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018: 498-503.
- [31] SHIH B, DROTMAN D, CHRISTIANSON C, et al. Custom soft robotic gripper sensor skins for haptic object visualization[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2017 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017: 494-501.
- [32] PARK W, SEO S, BAE J. Development of a sensorized hybrid gripper to evaluate grasping quality[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2019 2nd IEEE international conference on soft robotics (RoboSoft). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019: 149-154.
- [33] LI Y, CHEN Y, LI Y. Pre-charged pneumatic soft gripper with closed-loop control[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2): 1402-1408.
- [34] OZEL S, KESKIN N A, KHEA D, et al. A precise embedded curvature sensor module for soft-bodied robots[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 236: 349-356.
- [35] YAP H K, NG H Y, YEOW C H. High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(3): 144-158.

(责任编辑:陈海霞)