

# 一种带孔介电层结构柔性多维力传感器研究

朱银龙<sup>1,2</sup>, 吴杰<sup>1</sup>, 王旭<sup>1</sup>, 陈昕<sup>1</sup>, 王化明<sup>3</sup>

(1. 南京林业大学机械电子工程学院 南京, 210037)

(2. 中科院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳, 110169) (3. 南京航空航天大学机电学院 南京, 210016)

**摘要** 针对智能机器人人机交互过程中存在的接触柔顺性和环境适应性问题, 提出一种带孔结构的多维力柔性传感器的简单制备方法, 采用碳纳米管/聚二甲硅氧烷(carbon nanotubes/polydimethylsiloxane, 简称CNTs/PDMS)混合制备柔性电极, 以带孔结构的硅胶作为介电层, 组装制备电容式柔性多维力传感器。建立柔性多维力传感器的数学模型, 并通过试验获取柔性传感器的性能参数。试验结果表明: 传感器理论模型与试验曲线吻合性较好, 带孔结构的介电层能够提高传感器的灵敏度, 法向上的检测范围为0~50 N, 分辨率为0.05 N; 切向上的检测范围为0~10 N, 分辨率为0.15 N。将其安装在机器人手爪上进行了水果抓取试验, 成功检测出水果抓取过程中的夹紧力, 进一步表明该传感器具有较好的实用性。

**关键词** 电容式传感器; 柔性传感器; 多维力觉; 传感器建模

**中图分类号** TH823; TP212

## 引言

与视觉和听觉感知技术一样, 触觉传感技术<sup>[1]</sup>是机器人感知技术的重要组成部分。目前, 智能机器人可代替人手完成一些物体的抓取作业, 但是还难以完成非结构化环境下的复杂精细作业。因此, 需要在智能机器人上集成触觉传感器, 为机器人持续提供接触力、温湿度及滑觉等信息<sup>[2-5]</sup>, 以增强机器人与外界环境的交互能力。传统的刚性传感器由于其结构和材料的限制, 无法满足机器人抓取过程中复杂动作对柔顺性和环境适应性的要求, 而柔性传感器具有较好的柔韧性、可靠性和灵活性, 可以像人类皮肤一样贴合于不同表面形貌的物体上, 能够精准、迅速地实现对外界信息的获取<sup>[6-8]</sup>。近年来, 随着智能材料、加工工艺的发展, 触觉传感器的柔顺性、精度及空间分辨率等性能均取得了较大进展, 但是由于制作成本高、稳定性不佳等原因, 限制了触觉传感器在智能机器人领域的应用。为此, 需要研究低成本的触觉传感器制造工艺与方法, 以提高机器人智能化水平<sup>[9]</sup>。

柔性多维力传感器的研究吸引了广大学者的兴趣<sup>[10-12]</sup>, 各种新型结构与材料被竞相使用。就传感

原理而言, 多维力觉传感器主要包括压阻式、压电式及电容式等<sup>[13-15]</sup>。Viry等<sup>[16]</sup>设计了一种电容式柔性三维力传感器, 传感器通过上下电极间的二维重叠设计来测量三维力, 该传感器的灵敏度较高, 稳定性好, 成本较低, 但其电极是不可拉伸的, 导致传感器的拉伸性较差。张艳芳等<sup>[17]</sup>研制了一种基于聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, 简称PVDF)压电薄膜的三维力觉传感器, 该传感器的中间层是3块夹角均为120°的PVDF压敏单元, 顶部是采用PDMS制作的半球形凸块, 用来传递载荷。试验表明, 该传感器能有效分辨载荷的大小与方向, 传感器的测量范围广, 但制作成本较高, 且会受到电磁干扰。Tang等<sup>[18]</sup>通过组合可控石墨烯皱纹(graphene wrinkles, 简称GNWs)和PDMS弹性体, 制备了一种柔性压阻式传感器, 并将其安置在鞋垫里, 以测量不同步态下足底压力分析情况。Chen等<sup>[19]</sup>提出了一种3D打印方法来制备具有同轴芯-鞘结构的可拉伸弹性纤维传感器, 石墨烯和聚四氟乙烯(poly tetra fluoro-ethylene, 简称PTFE)颗粒的添加控制了PDMS预聚物的流变行为, 经纱和纬纱的交错结构改善了电子皮肤的透气性和拉伸性, 但其制备过程相对复杂。关于柔性传感器, 国内学者进行了大量的研究<sup>[20-24]</sup>。

\* 国家自然科学基金资助项目(51305209); 江苏省高等学校自然科学研究资助项目(18KJA4600050, 21KJB460010); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目(GDZB-024); 机器人学国家重点实验室开放基金资助项目(2018-O16)

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2021-12-20

笔者提出一种带孔结构的柔性多维力传感器的简单制备方法,以碳纳米管与PDMS混合制备柔性电极,采用带孔结构的硅胶作为柔性介电层。建立了柔性多维力传感器的数学模型,并试验研究了该传感器的灵敏度、迟滞特性等性能参数。柔性多维力传感器切向力、法向力检测试验数据与理论数据比较吻合。传感器安装在机器人手抓内侧进行了水果抓取试验,进一步表明该传感器具有较好的实用性。本研究制作的传感器,工艺简单,成本较低,具有良好的稳定性和柔韧性。

## 1 柔性多维力传感器的设计与制造

如图1(a)所示,柔性传感器主要是由介电层、上下电极层、表面受力层和保护层组成,其中介电层位于上下电极之间,尺寸为 $22\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。上电极由4块大小相同的正方形电极组成,每块电极的尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ,下电极的尺寸为 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ ,上下电极的电容正对面积为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。上下电极的排布方式如图1(b)所示,上下电极之间的重叠关系构成4个电容,依据4个电容值的变化情况,可以实现三维力大小与方向的检测。

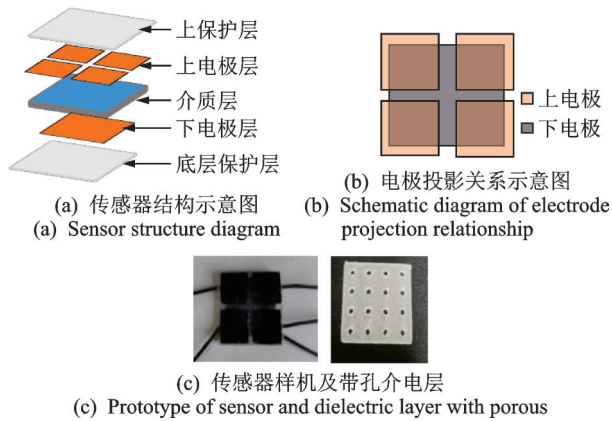


图1 传感器结构及样机  
Fig.1 Sensor structure and prototype

采用美国Smooth-on公司的Ecoflex 00-30硅胶制备介电层,将硅胶的A剂和B剂以质量比1:1的比例混合放入磁力搅拌机搅拌并抽真空10 min去除气泡。制作好的硅胶导入模具中固化1 h得到介电层。制作好的电极层、介质层与表面受力层上下对齐放置,使用与介质层相同材料的Ecoflex 00-30硅胶粘接,并在电极层和介质层之间使用屏蔽电线将上下电极引出,得到柔性传感器,柔性传感器的实物如图1(c)所示。

电极层制备流程如图2所示,将PDMS预聚体和固化剂按质量比10:1混合,放入搅拌机中搅拌并抽真空10 min去除气泡。采用碳纳米管作为电极材料,将0.1 g的CNTs分散至10 g甲苯溶剂中,超声分散2.5 h,然后将CNTs分散液均匀滴涂于涂布机上并使甲苯溶液挥发。配置好的PDMS溶液均匀覆盖于CNTs薄膜的表面,在 $70^\circ\text{C}$ 下进行30 min固化,然后将制作完成的CNTs/PDMS薄膜从涂布机上剥离,将其裁剪成所需形状大小作为柔性传感器电极层使用。

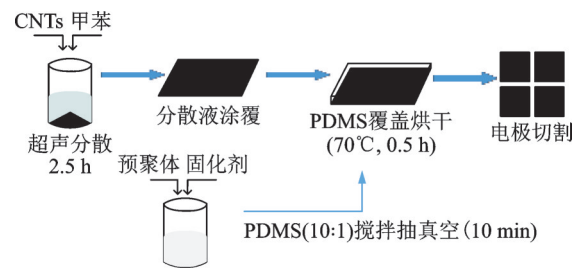


图2 电极层制备示意图

Fig.2 Schematic diagram of electrode layer preparation

## 2 传感器理论建模

### 2.1 法向力建模分析

令传感器受到的法向力大小为 $F_z$ ,传感器的初始电容值为 $C_0$ ,上下电极间的初始正对面积为 $S_0$ ,初始间距为 $d_0$ ,传感器受到法向力后的电容值为 $C$ ,上下电极间的距离为 $d$ ,间距变化量为 $\Delta d$ ,则电容值的变化量 $\Delta C_z$ 为

$$\Delta C_z = C - C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 S_0 \Delta d / (d d_0) \quad (1)$$

传感器的电容相对变化量可以表示为

$$\Delta C_z / C_0 = \Delta d / (d_0 - \Delta d) \quad (2)$$

硅胶是一种非线性超弹性材料,制成的柔性传感器受力变形较大,传统的线性本构关系不足以准确描述传感器受力与变形之间的关系,为此采用Yeoh形式的应变能方程表征传感器力学行为。同时忽略CNTs/PDMS电极层对硅胶层变形约束,并假设硅胶介电层为不可压缩材料,则传感器各方向真实主应力 $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 可以表示为

$$\sigma_i = \lambda_i \partial W / \partial \lambda_i - p = 2\lambda_i^2 [C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3)^2] - p \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

其中: $C_{10}$ 和 $C_{20}$ 为材料参数; $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ , $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ ; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为 $x, y, z$ 轴3个方向的主伸

长比; $p$ 为静水压力,可通过不可压缩假设确定。

传感器法向受力时, $\lambda_1 = \lambda_2, \sigma_1 = \sigma_2 = 0$ , 据此可得

$$\sigma_3 = 2(\lambda_3^2 - \lambda_3^{-1}) \left\{ C_{10} + 2C_{20} [2\lambda_3^{-1} + (\lambda_3^2 - 3)] \right\} \quad (4)$$

根据  $\lambda_3 = d/d_0, \sigma_3 = F_z/S_0$ , 代入式(4), 结合式(2)可得

$$F_z = 2S_0(\Delta C_z/C_0 + 1) [(\Delta C_z/C_0 + 1)^{-2} - (\Delta C_z/C_0 + 1)] \{ C_{10} + 2C_{20} [2(\Delta C_z/C_0 + 1) + (\Delta C_z/C_0 + 1)^{-2} - 3] \} \quad (5)$$

由式(5)求得传感器受到的法向力  $F_z$  与传感器电容相对变化量  $\Delta C_z/C_0$  的关系。 $z$  方向的电容变化量  $\Delta C_z$  表示为  $C_{11}, C_{12}, C_{21}$  和  $C_{22}$  这 4 个电容值变化量的均值

$$\Delta C_z = (\Delta C_{11} + \Delta C_{12} + \Delta C_{21} + \Delta C_{22})/4 \quad (6)$$

### 2.2 切向力工作原理

传感器受到切向力时,电容值的变化是由两极板间的正对面积的变化引起的,如图 3(a)所示。 $x$  方向受力示意如图 3(b)所示, $y$  方向受力同理。设传感器受到的切向力大小为  $F_x$ , 正对面积变化量为  $\Delta S$ , 则电容变化量  $\Delta C_x$  为

$$\Delta C_x = \epsilon \epsilon_0 d_0 \Delta S / (d d_0) \quad (7)$$

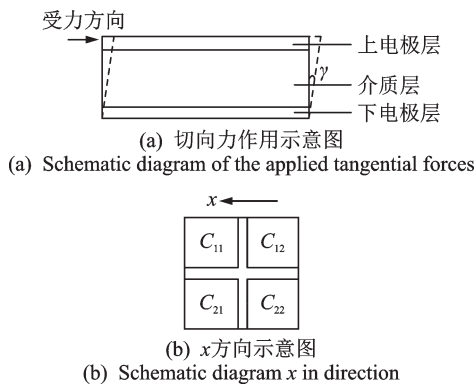


图 3 切向力作用示意图

Fig.3 Schematic diagram of the applied tangential forces

式(7)可转化为传感器电容变化量与正对面积变化量的关系为

$$\Delta C_x / C_0 = \Delta S / S_0 \quad (8)$$

切应力可以表示为

$$\tau = F_x / S_0 \quad (9)$$

由于切应变  $\gamma$  非常微小,可以表示为

$$\gamma \approx \tan \gamma \quad (10)$$

根据剪切胡克定律可得

$$\Delta S = 2d_0(1 + \mu)E^{-1}S_0^{-1/2}F_x - [2d_0(1 + \mu)E^{-1}S_0^{-1}]^2 F_x^2 \quad (11)$$

将式(11)代入式(8), 经整理可得切向力大小  $F_x$  与电容变化量  $\Delta C_x$  的关系为

$$F_x = ES_0^{3/2} \left( 1 - \sqrt{1 - 4\Delta C_x / C_0} \right) / 4d_0(1 + \mu) \quad (12)$$

$\Delta C_x$  用  $\Delta C_{11}, \Delta C_{12}, \Delta C_{21}$  和  $\Delta C_{22}$  表示为

$$\Delta C_x = \frac{(\Delta C_{12} + \Delta C_{22}) - (\Delta C_{11} + \Delta C_{21})}{4} \quad (13)$$

$y$  方向电容变化量  $\Delta C_y$  可表示为

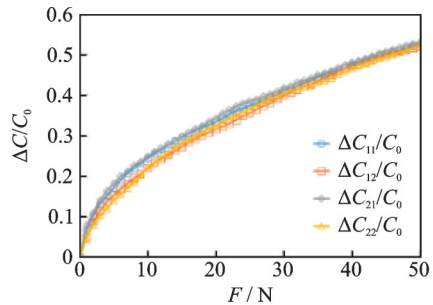
$$\Delta C_y = \frac{(\Delta C_{21} + \Delta C_{22}) - (\Delta C_{11} + \Delta C_{12})}{4} \quad (14)$$

## 3 试验研究

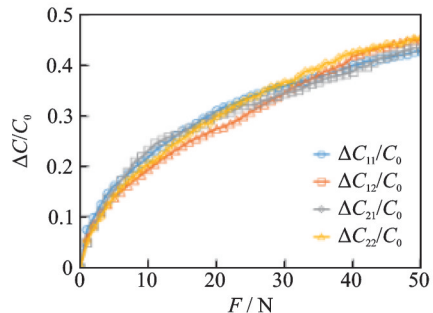
### 3.1 传感器法向力测试

将制作好的带孔硅胶介电层传感器和纯硅胶介电层传感器放在试验平台上,使用推拉力计施加法向力,记录 4 个电容值。法向力的有效量程为 0~50 N, 每间隔 1 N 进行法向力的加载,重复加载 5 次取平均,传感器的输出特性曲线如图 4 所示。

为了便于直观分析带孔结构对传感器的影响,



(a) 带孔介电层传感器法向输出曲线  
(a) Normal output curve of a dielectric layer sensor with porous structure



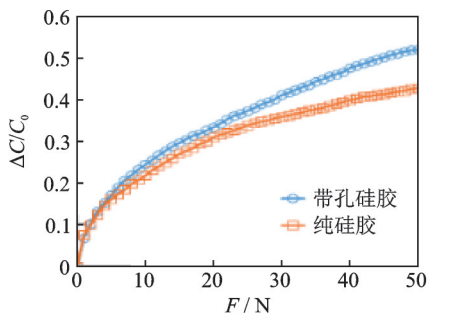
(b) 硅胶介电层传感器法向输出曲线  
(b) Normal output curve of a dielectric layer sensor without porous structure

图 4 两种介电层传感器的法向输出特性曲线

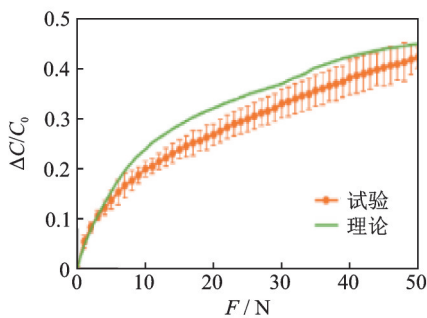
Fig.4 Output characteristic curves for two dielectric layer sensors under normal pressure

绘制带孔介电层和纯硅胶介电层的传感器法向上的输出特性曲线的比较,如图5(a)所示。由图可见:带孔介电层传感器在0~10 N的法向灵敏度为 $0.045 \text{ N}^{-1}$ ,11~50 N的灵敏度为 $0.019 \text{ N}^{-1}$ ;纯硅胶介电层柔性传感器在0~10 N的法向灵敏度为 $0.03 \text{ N}^{-1}$ ,11~50 N的灵敏度为 $0.008 \text{ N}^{-1}$ 。带孔结构可以显著改善传感器的灵敏度。主要原因是传感器法向受力时,孔结构使介电层厚度易于变化。

通过对硅胶材料进行拉伸试验,对试验数据进行拟合,得材料参数 $C_{10}=0.11, C_{20}=0.02$ ,硅胶介电常数取2.66,根据式(6)和式(13)可得理论电容曲线。图5(b)所示为试验测得带孔结构的传感器电容曲线与理论模型相比较,两者的数值变化趋势吻合,但是有一定偏差。偏差产生的原因有两方面:①理论模型未考虑空气中对传感器介电常数的影响;②在施加力的过程中有部分力被表层柔性封装层吸收,未传递到介电层引起电容变化。



(a) 传感器法向力灵敏度比较  
(a) Sensor normal force sensitivity comparison



(b) 法向力检测试验数据与理论数据  
(b) Normal force detection test data and theoretical data

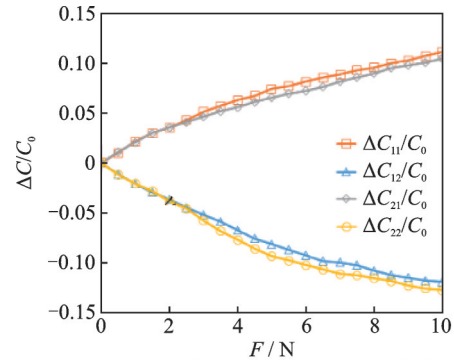
图5 带孔/无孔介电层传感器法向力试验

Fig.5 Normal force test of dielectric layer sensors dielectric layer sensor with/without porous structure

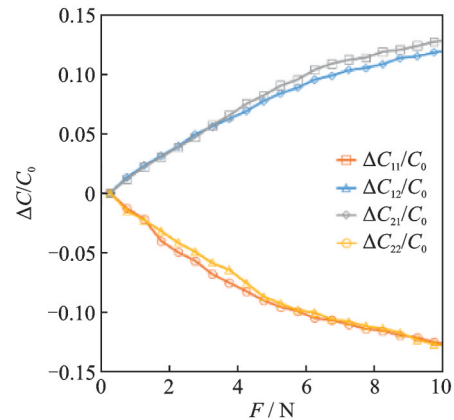
### 3.2 传感器切向力测试

使用同样的方法对带孔硅胶介电层传感器和纯硅胶介电层传感器在切向上进行测试。切向力 $x, y$ 方向的定义与图5定义相同,使用推拉力计分别在

$x, y$ 方向对传感器施加切向力,记录不同切向力下的电容值。切向力的有效量程为0~10 N,传感器的输出特性曲线如图6所示。



(a) 带孔介电层传感器切向输出曲线  
(a) Tangential output curve of a dielectric layer sensor with porous structure

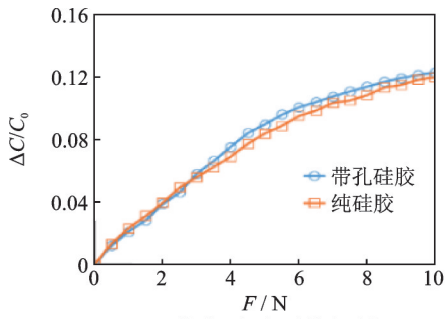


(b) 硅胶介电层传感器切向输出曲线  
(b) Tangential output curve of a dielectric layer sensor without porous structure

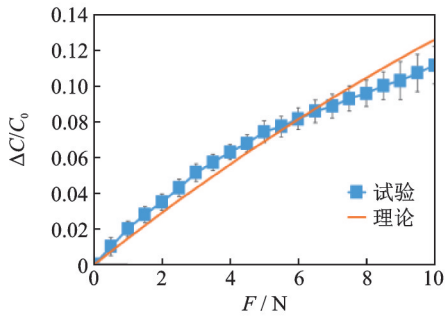
图6 传感器的切向输出特性

Fig.6 Output characteristic curves for two dielectric layer sensors under tangential force

带孔介电层和纯硅胶处理介电层制备的传感器在切向上的输出特性曲线比较如图7(a)所示。带孔介电层柔性传感器在切向0~5 N的灵敏度为 $0.034 \text{ N}^{-1}$ ,6~10 N的灵敏度为 $0.016 \text{ N}^{-1}$ ;纯硅胶介电层柔性传感器在切向0~5 N的灵敏度为 $0.03 \text{ N}^{-1}$ ,6~10 N的灵敏度为 $0.011 \text{ N}^{-1}$ 。可以看出,带孔结构传感器的切向灵敏度有一定改善,但变化效果不如法向灵敏度。其原因是由于传感器作用力量程相对较小,切向变形相对于法向变形也较小。将试验所得硅胶介电层曲线与理论值相比较,两者的数值大小如图7(b)所示。造成切向力方向上的误差可能是由于模型假设的是电极的间距没有改变,而实际施加切向力的时候无法保证电极的间距不改变,试验中切向力的改变可能是由间距和面积的改变同时造成的。



(a) 传感器切向灵敏度对比  
(a) Sensor tangential force sensitivity comparison



(b) 试验数据与理论数据切向比较  
(b) Tangential force detection test data and theoretical data

图7 传感器切向力试验

Fig.7 Tangential force test of sensors

## 4 传感器测试试验

### 4.1 传感器多维力测试

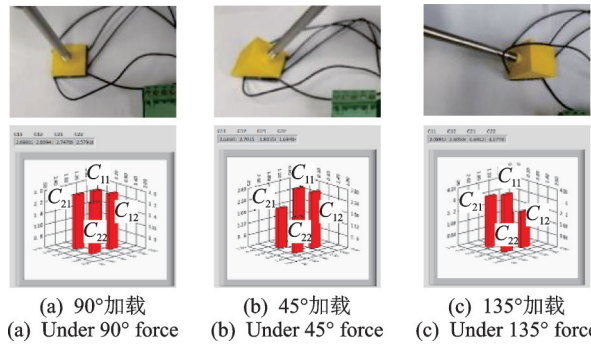
采用最小二乘法对传感器进行标定后,得到法向上的输出特性曲线方程为

$$F = 61 - 5000 \sqrt{0.00015156 - 0.0004(\Delta C/C_0)} \quad (15)$$

切向受力  $F$  与电容相对变化量的关系可以表示为

$$F = 22.75 - 2500 \sqrt{0.00007769 - 0.0008(\Delta C/C_0)} \quad (16)$$

为了对传感器在多维力方向上的性能进行测试,如图8(a)所示。通过力加载块对传感器施加不同方向的力,采集到的电容在上位机 LabVIEW 中的实时分布如图8(b)所示。可以看出,传感器能够对不同方向的力进行采集,通过传感器的4个电容大小改变的不同来对施加力的方向进行判断。图8中施加力的方向分别为  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $135^\circ$  (压杆与传感器接线侧夹角),测量结果与理论推导一致。在  $90^\circ$  正压力加载情况下,4个电容值基本相同;  $45^\circ$  与  $135^\circ$  加载结果表明,  $C_{11}$  与  $C_{12}$  结果相近,  $C_{21}$  与  $C_{22}$  结果相近,并且通过  $C_{11}$  与  $C_{21}$  的数值大小可以反推出施加力的方向。



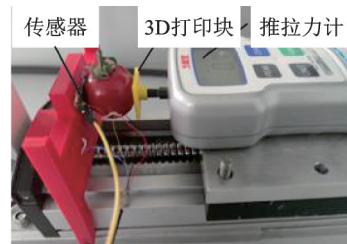
(a) Under  $90^\circ$  force (b) Under  $45^\circ$  force (c) Under  $135^\circ$  force

图8 传感器不同受力状态下的电容分布图

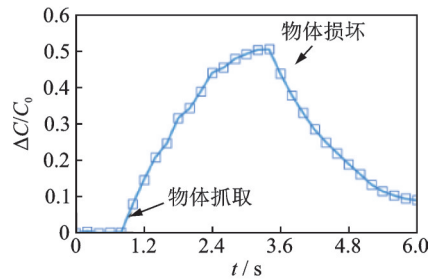
Fig.8 Capacitance distribution of the sensor under different stress states

### 4.2 传感器应用试验

对圣女果进行夹持损伤试验,如图9所示。圣女果固定在传感器与推拉力计3D打印触头之间,得到无损夹持圣女果的力的范围。夹持过程中传感器的电容相对变化如图9(b)所示,在夹持力为  $0.35\text{ N}$  时,能够实现夹持圣女果;在夹持力达到  $45\text{ N}$  时,圣女果出现裂纹,此时停止对圣女果的挤压;但圣女果的裂纹会慢慢变大,夹持力也会逐渐降低。



(a) 圣女果夹持试验装置  
(a) Cherry tomato clamping injury device



(b) 电容变化曲线  
(b) Capacitance change curve

图9 圣女果夹持损伤试验

Fig.9 Cherry tomato clamping injury test

为了防止在抓取水果时出现滑移,对柔性传感器进行了滑移力的测试,滑移力测试装置如图10(a)所示。传感器固定于机械手爪上,并预加载  $10\text{ N}$  的法向力。细线一端固定于推拉力计上,另一端与夹持物体固定,控制滑台以  $0.3\text{ mm/s}$  的速度匀速移

动,使得夹持物体与柔性传感器之间相对运动。由于滑台的运动是匀速运动,拉力等于摩擦力。柔性传感器在测试过程中的电容相对变化如图10(b)所示。

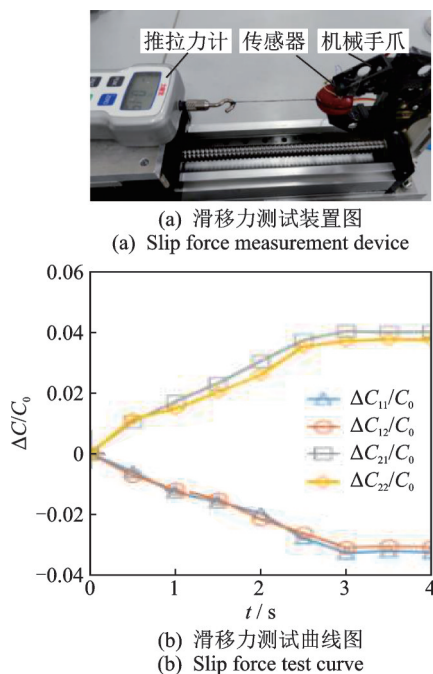


图10 滑移力测量试验

Fig.10 Slip force measurement test

如图11所示,将柔性传感器固定在机械手爪的一侧上,利用机械手爪对橘子、圣女果和芒果3种水果进行抓取测试,测得机械手稳定抓取橘子、圣女果和芒果的夹持力分别为0.72,0.15和0.96 N。

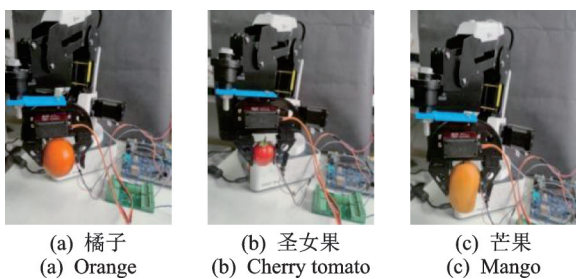


图11 机械手抓取水果实物图

Fig.11 The images of manipulator holding the fruit

## 5 结束语

设计制造了一种柔性多维力传感器,采用碳纳米管/聚二甲基硅氧烷(CNTs/PDMS)混合制备柔性电极,以带孔结构的硅胶作为介电层,确定了传感器的数学模型,并对传感器相关性能进行了试验研究。搭建了传感器的信号采集系统,实时采集传感器的信号。试验表明,带孔结构可以显著改善传感

器的灵敏度,制作的柔性传感器在一定误差范围内,可以准确及时地反映受力状态。将传感器应用于水果的抓取时,可以测出夹持力与滑动摩擦力。传感器通过将多个电极结构硅胶固化成型实现对三维力的测量,提高了多维力柔性传感器的集成度,降低了传感器的制造成本,通过改变介电层结构提高传感器的灵敏度。该传感器具有较好的可靠性与稳定性,可用于机器人作业时实现对夹持力的有效测量与控制。

## 参 考 文 献

- [1] CHI C, SUN X, XUE N, et al. Recent progress in technologies for tactile sensors [J]. *Sensors*, 2018, 18(4):36-40.
- [2] FASTIER-WOLLER J W, DAU V T, DINH T, et al. Pressure and temperature sensitive e-skin for in situ robotic applications [J]. *Materials & Design*, 2021, 208:109886.
- [3] 郑炬炬,孙志俊,闫鹤,等.运用中空超声电机的血管介入手术机器人系统[J].*振动、测试与诊断*,2021,41(5):976-983.  
ZHENG Jujū, SUN Zhijun, YAN He, et al. Master-slave controlled robotic system based on hollow ultrasonic motor for vascular interventional surgery[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(5):976-983. (in Chinese)
- [4] GAO S, WU X, MA H, et al. Ultrathin multifunctional graphene-PVDF layers for multidimensional touch interactivity for flexible displays [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017,9:18410-18416.
- [5] 毛婷,彭瀚旻,查泽琳,等.形状记忆合金驱动的连接跳跃柔性机器人[J].*振动、测试与诊断*,2021,41(3):447-452.  
MAO Ting, PENG Hanmin, CHA Zelin, et al. Continuous jumping soft robot driven by shape memory alloy [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(3):447-452. (in Chinese)
- [6] GUO Y, WEI X, GAO S, et al. Recent advances in carbon material-based multifunctional sensors and their applications in electronic skin systems [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021,31:2104288.
- [7] 朱银龙,华超,苏晓芳,等.柔性压力传感器阵列及其信号采集系统研究[J].*农业机械学报*,2020,51(8):400-405,413.  
ZHU Yinlong, HUA Chao, SU Xiaofang, et al. Research on flexible pressure sensor array and its signal acquisition system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(8):400-405,

413. (in Chinese)
- [8] LI R, ZHOU Q, BI Y, et al. Research progress of flexible capacitive pressure sensor for sensitivity enhancement approaches[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 321:112425.
- [9] ZHAO S, ZHU R. Flexible electronic skin with multisensory integration[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2019, 77:1250-1262.
- [10] PARK M, PARK Y J, CHEN X, et al. MoS<sub>2</sub>-based tactile sensor for electronic skin applications [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28:2556-2562.
- [11] 左双双, 习爽. 基于聚吡咯的导电聚合物驱动器的制备及驱动特性研究[J]. *分析化学*, 2019, 47(12): 1960-1966.  
ZUO Shuangshuang, XI Shuang. Preparation and driving characteristics of conductive polymer drivers based on polypyrrole[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(12): 1960-1966. (in Chinese)
- [12] 许超群, 俞娟, 范一民, 等. 原子转移自由基聚合法接枝改性纳米纤维素及其功能化应用[J]. *化工学报*, 2022, 73(3):1022-1043.  
XU Chaoqun, YU Juan, FAN Yimin, et al. Chemical modification of nanocellulose via atom transfer radical polymerization: strategy, applications and challenges [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2022, 73(3):1022-1043. (in Chinese)
- [13] 曹建国, 程春福, 周建辉, 等. 机器人仿生电子皮肤阵列触觉传感器研究[J]. *中国测试*, 2020, 46(12): 1-8, 59.  
CAO Jianguo, CHENG Chunfu, ZHOU Jianhui, et al. Research on tactile sensor of robot bionic electronic skin array[J]. *China Testing*, 2020, 46(12): 1-8, 59. (in Chinese)
- [14] ZHANG L, ZHANG S, WANG C, et al. Highly sensitive capacitive flexible pressure sensor based on a high-permittivity MXene nanocomposite and 3d network electrode for wearable electronics [J]. *ACS Sensors*, 2021, 6(7): 2630-2641.
- [15] SHEN X, ZHAO S, WAN A. A sensitive and flexible sensor enhanced by constructing graphene-based polyaniline conductive networks [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 330: 112862.
- [16] VIRY L, LEVI A, TOTARO M, et al. Flexible three-axial force sensor for soft and highly sensitive artificial touch[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26:2659-2664.
- [17] 张艳芳, 刘玉荣, 许章铖. 基于PVDF三维力传感器设计[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(7):66-72.  
ZHANG Yanfang, LIU Yurong, XU Zhangcheng. Design based on PVDF three-dimensional force sensor[J]. *Chinese Journal of Instrumentation*, 2021, 42(7): 66-72. (in Chinese)
- [18] TANG X, YANG W, YIN S, et al. Controllable graphene wrinkle for a high-performance flexible pressure sensor [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13:20448-20458.
- [19] CHEN Y, DENG Z, OUYANG R, et al. 3D printed stretchable smart fibers and textiles for self-powered e-skin[J]. *Nano Energy*, 2021, 84: 105866.
- [20] 毛磊东, 黄英, 郭小辉, 等. 一种可感知三维力的新型柔性触觉传感器及滑觉识别算法研究[J]. *传感技术学报*, 2018, 31(6):891-897.  
MAO Leidong, HUANG Ying, GUO Xiaohui, et al. Research on a novel flexible tactile sensor and slip recognition algorithm that can sense three-dimensional force [J]. *Chinese Journal of Sensing Technology*, 2018, 31(6):891-897. (in Chinese)
- [21] CHEN S, WANG Y, YANG L, et al. Electron-induced perpendicular graphene sheets embedded porous carbon film for flexible touch sensors[J]. *Nano-Micro Letter*, 2020, 12(1):1-13.
- [22] 徐雪杰, 朱子才, 罗斌, 等. CNT/PDMS柔性传感材料的打印工艺及性能研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(15):97-103.  
XU Xuejie, ZHU Zicai, LUO Bin, et al. Research on printing process and performance of CNT/PDMS flexible sensing materials[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(15):97-103. (in Chinese)
- [23] 汪延成, 鲁映彤, 丁文, 等. 柔性触觉传感器的三维打印制造技术研究进展[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(19): 239-252.  
WANG Yancheng, LU Yingtong, DING Wen, et al. Research progress on 3d printing manufacturing technology of flexible haptic sensor[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(19): 239-252. (in Chinese)
- [24] 姚建涛, 张弘, 勾栓栓, 等. 基于微孔抽丝成型工艺的软体力/位传感器[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(2):33-41.  
YAO Jiantao, ZHANG Hong, GOU Shuanshuan, et al. Soft force/position sensor based on microporous wire drawing molding process [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(2):33-41. (in Chinese)



**第一作者简介:**朱银龙,男,1981年1月生,博士,副教授。主要研究方向为软体机器人、机器人传感与控制技术、智能材料及其应用。曾发表《柔性压力传感器阵列及其信号采集系统研究》(《农业机械学报》2020年第51卷第8期)等论文。  
E-mail: ylzhu@njfu.edu.cn