

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107632

基于 PVDF 三维力传感器设计*

张艳芳¹, 刘玉荣^{1,2}, 许章铨¹

(1. 华南理工大学微电子学院 广州 510640; 2. 广东省人工智能与数字经济实验室 广州 510335)

摘要:在现代机器人技术和柔性电子应用中,迫切需要具有高灵敏度、良好灵活性和三维力测量能力的柔性触觉传感器。本文提出了一种基于聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜的触觉传感器,实现动态三维力测量。传感器由3个夹角为120°的PVDF压电敏感单元构成3个压力敏感区,3个压电敏感单元安置在聚二甲硅氧烷(PDMS)半球型结构的底面。从PDMS半球顶部传递的三轴接触力引起3个压电敏感单元的电荷分量发生变化,从而计算出接触力的方向和大小。本文推导了基于3个压电敏感单元触觉传感器的三维力算法,对所制备的传感器进行了标定,实现了三维动态力的测试。结果表明,角 θ 的平均误差为7.75%,角 ϕ 的平均误差为12.17%,力 F 的平均误差为7.48%。该三维力触觉传感器在穿戴式电子产品、健康医疗、人机交互等领域拥有很好的应用潜力。

关键词:压电传感器;三维力检测;聚偏氟乙烯薄膜;触觉传感器

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Design of three-dimensional force sensor based on PVDF

Zhang Yanfang¹, Liu Yurong^{1,2}, Xu Zhangcheng¹

(1. School of Micro-electronics, South China University of Technology, Guangdong 510640, China;

2. Guangdong Artificial Intelligence and Digital Economy Laboratory, Guangdong 510335, China)

Abstract: In modern robotics and flexible electronic applications, there is an urgent need for flexible tactile sensors with high sensitivity, good flexibility and three-dimensional force measurement. A tactile sensor based on polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric film is proposed to achieve dynamic three-dimensional force measurement. The sensor consists of three PVDF piezoelectric sensitive units with an angle of 120 degrees to form three pressure sensitive areas, and the three piezoelectric sensitive units are arranged on the bottom surface of the polydimethylsiloxane (PDMS) hemispherical structure. The triaxial contact force transmitted from the top of the PDMS hemisphere causes the change of piezoelectric charge in the three piezoelectric sensitive units, thereby calculating the direction and magnitude of the contact force. This paper derives a three-dimensional force algorithm of the tactile sensor with three sensitive units, and gives a calibration for the prepared sensor to realize the three-dimensional dynamic force test. Results show that the average error of angle θ is 7.75%, the average error of angle ϕ is 12.17% and the average error of force F is 7.48%. The three-dimensional force tactile sensor has good application potential in wearable electronics, health care, and human-computer interaction and other fields.

Keywords: piezoelectric sensor; three-dimensional force detection; polyvinylidene fluoride film; tactile sensor

0 引言

近年来,穿戴式电子设备、E-Skin (electronic skin)等技术发展迅速,而作为关键技术的触觉传感器备受人们关注^[1]。根据传感机理的不同,触觉传感器主要包括压

阻式^[2]、压电式^[3]、压容式^[4]和光学式等类型。相对而言,压电式触觉传感器具有高灵敏度、快速动态响应、低能耗甚至自供能等优势^[5-6],在动态力信息检测和模仿人类皮肤触觉感知等领域具有极为广阔的应用前景。在众多的压电材料中,以钛酸锆铅(PbZrTiO₃, PZT)为代表的传统陶瓷基压电材料因优异的压电特性、低成本等优势,

收稿日期:2021-03-19 Received Date:2021-03-19

* 基金项目:国家自然科学基金(61871195)、广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515011872)项目资助

被广泛应用于压力传感器和超声换能器,但其易脆性限制了其在柔性可穿戴领域的应用。为满足柔性化的应用需求,一些新型的压电材料倍受关注,比如聚偏氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF)^[7]、有机复合 PZT^[8]、低维纳米结构 ZnO^[9] 和 MoS₂^[10] 等,其中, PVDF 具有低介电常数、高柔韧性、宽频响、耐腐蚀性好、机械强度高、易大面积成膜等优点,已在柔性设备、E-Skin 等领域展现出特有的应用优势^[11]。

在众多的应用场景,触觉(或压力)传感器需要同时准确获取力的大小和方向信息,现有的力传感器大都只能提供力的大小信息,无法给出力的方向信息,三维力传感器可同时检测出外力的大小和方向,已成为一个热门的研究方向^[12-13]。目前,基于压阻、压电和电容式传感机理的三维力传感器皆有所报道。Liu 等^[14]制备的三维力传感器含四个电容式敏感单元,四棱台结构的聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 作为力传输层,覆盖在敏感单元上,保证力的均匀传递。Zhu 等^[15]使用压阻型 PI 薄膜制备出一种可用于机器人触觉感知的柔性三维力传感器,传感器由四个压阻式敏感单元构成,在外力作用下四个方位的传感单元阻值发生变化,从而推导出三维力的大小和方向信息。基于 PVDF 压电薄膜的三维力传感器也有所报道, Pan 等^[16]设计了一种基于 PVDF 的三维力机器人触觉传感器,该传感器通过将四个 PVDF 压电薄膜敏感单元安置在四棱台结构体的四个侧面,来获取三维力大小和方向信息,并采用该器件结构设计出基于 PVDF 的指尖三维力检测传感器阵列,应用于实际的三维力信息检测^[17]。Cheng 等^[18]则在 PDMS 四棱台的底面安置 4 个 PVDF 压电敏感单元,通过分析四个单元力信息,计算出三维力大小和方向信息。

本文利用 PVDF 压电薄膜敏感单元,设计了一个 PDMS 半球结构的三维力传感器,通过在半球底部圆面安置 3 个夹角为 120° 的 PVDF 薄膜单元构成 3 个压电敏感单元,实现三维力信息感知。相较于常见的四棱台结构^[16-18],传感器仍能保持较高的灵敏度和较小的测量误差,且减小了一个压电敏感单元,降低制作成本。

1 传感器结构与检测原理

1.1 传感器结构

三维力传感器结构如图 1 所示。最上层为 PDMS 半球凸块层,采用道康宁 SYLGARD 184 硅橡胶材料制成,该层作为介质层以保证力的均匀传递。中间层为 PVDF 压电敏感单元层,敏感单元型号为 LDT0-028 K,厚度为 28 μm,其被包裹在厚度为 0.125 mm 的聚酯基片中,尺

寸大小如图 1 所示。底层为万用板基底层,利用 Ergo5800 绝缘强力胶将 PVDF 敏感单元固定在该层,传感器之间的夹角为 120°,再将 PDMS 半球凸块用绝缘胶固定在传感器上,并使其底面圆心与阵列中心重合,最终传感器实物图如图 2 所示。

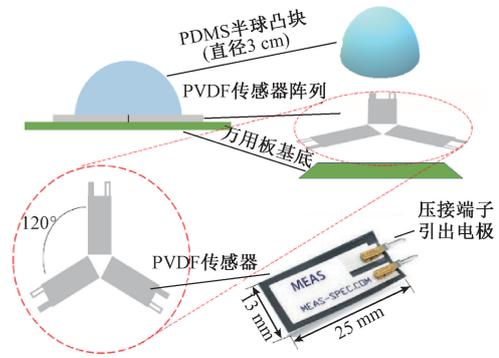


图 1 三维力传感器结构

Fig. 1 Structure of the 3D force sensor

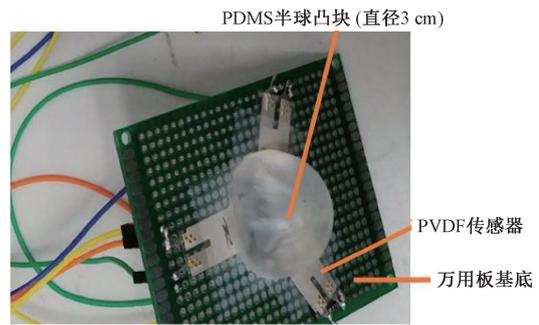
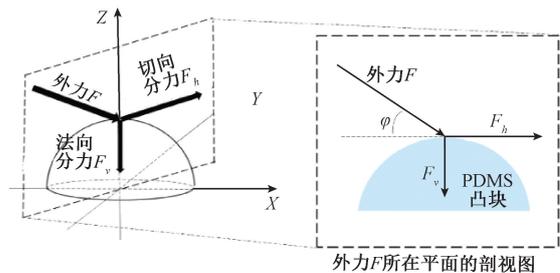


图 2 三维力传感器实物图

Fig. 2 Photograph of the 3D force sensor

1.2 三维力测试原理

图 3 为外力 F 分解示意图, X 、 Y 、 Z 轴方向的定义如图 3(a) 左半部分所示。将外力 F 分解成切向分力 F_h 和法向分力 F_v , 而切向分力 F_h 又可以在 XOY 平面进一步分解。其中, φ 为外力 F 与 XOY 平面的夹角, θ 为切向分力 F_h 与坐标 X 轴正向的夹角。一组 F 的大小、 θ 和 φ 数值即可准确表示一个外部接触三维力信息。



(a) F 分解切向力 F_h 和法向力 F_v

(a) Illustrations of tangential and normal forces

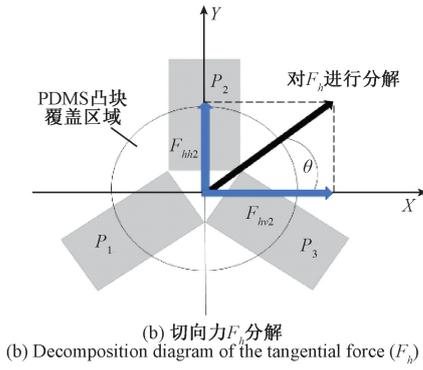


图3 外力分解示意图

Fig. 3 Schematic diagram of external force decomposition

当切向力作用在 PDMS 凸块上,其底面受力情况如图 4 所示。由于 PDMS 凸块的对称结构,所以底面一部分受拉力、一部分受压力,并将力传递至 PVDF 压电敏感单元上。

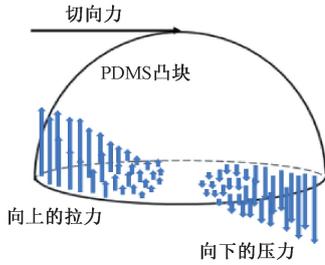


图4 半球底部在切向力作用下的受力情况

Fig. 4 Bearing forces on the bottom of the hemisphere under a tangential force

如图 3(b) 所示, P_1 、 P_2 、 P_3 分别代表 3 个 PVDF 压电敏感单元。以 P_2 为例,当力垂直作用于 PDMS 时,法向分力 F_v 作用在 P_2 的力:

$$F_{2v} = F_v \lambda_v = F \sin \varphi \lambda_v \quad (1)$$

其中, λ_v 为法向分力 F_v 传递至 P_2 表面力的传递系数。将切向分力 F_h 按图 3(b) 分解, F_{hv2} 垂直于 P_2 , F_{hv1} 平行于 P_2 。当 F_{hv2} 作用在 P_2 上时,由于结构对称,可近似认为 P_2 上受到的拉力和压力相等,生成的电荷会相互抵消,因此 F_{hv2} 可近似认为对 P_2 无作用产生。而平行于 P_2 的切向分力 F_{hv1} 则会对 P_2 单元产生向下的压力 F_{2h} :

$$F_{2h} = \lambda_h F_{hv1} = \lambda_h F_h \cos(90^\circ - \theta) \quad (2)$$

其中, λ_h 为切向分力 F_h 至 P_2 表面力的传递系数。因此,外力 F 作用在 P_2 单元上的力可表示为:

$$F_2 = F_{2h} + F_{2v} = \lambda_v F_v + \lambda_h F_h \cos(90^\circ - \theta) \quad (3)$$

由于 P_1 、 P_2 、 P_3 布局对称,同理可得 P_1 、 P_3 上的受力 F_1 、 F_3 ,因此当外力 F 作用于 PDMS 凸块时, P_1 、 P_2 、 P_3 敏感单元上表面受到的力 F_1 、 F_2 、 F_3 分别为:

$$\begin{cases} F_1 = \lambda_v F \sin \varphi + \lambda_h F \cos \varphi \cos(210^\circ - \theta) \\ F_2 = \lambda_v F \sin \varphi + \lambda_h F \cos \varphi \cos(90^\circ - \theta) \\ F_3 = \lambda_v F \sin \varphi + \lambda_h F \cos \varphi \cos(330^\circ - \theta) \end{cases} \quad (4)$$

PVDF 压电薄膜受到极化方向的外力时,因机械形变表面会产生电荷,且产生的电荷与力呈线性相关。基于此工作原理,PVDF 敏感单元的压电效应只需考虑 d_{33} 工作模式^[18],此时 PVDF 上下电极产生的电荷 Q 与极化方向的外力 F 之间的关系可表示为:

$$Q_i = d_i F_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

d_i ($i = 1, 2, 3$) 分别为 3 个 PVDF 敏感单元的压电系数 d_{33} 值。为了采集 3 个 PVDF 敏感单元的电荷信号,首先需要利用电荷放大器对微小的电荷信号进行放大,并将其转换为电压信号输出,电压信号峰值 V_{pi} 可表示为:

$$V_{pi} = \eta Q_i \quad (6)$$

其中, η 为电荷放大模块灵敏度,由 V_{pi} 计算三维力信息前,需要对三维力传感器进行标定。设 PVDF 敏感单元 P_i 的法向标定参数为 d_{vi} ,切向标定参数为 d_{hi} ,由式(4)~(6),可得:

$$\begin{cases} d_{vi} = \eta d_i \lambda_v \\ d_{hi} = \eta d_i \lambda_h \\ d_{h-v} = \frac{d_{hi}}{d_{vi}} = \frac{\lambda_h}{\lambda_v} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

将式(7)代入式(4),可得:

$$\begin{cases} \theta = \arctan \left(\frac{\sqrt{3} \left(2 \frac{V_{p2}}{d_{h2}} - \frac{V_{p1}}{d_{h1}} - \frac{V_{p3}}{d_{h3}} \right)}{3 \left(\frac{V_{p3}}{d_{h3}} - \frac{V_{p1}}{d_{h1}} \right)} \right) \\ \varphi = \operatorname{arccot} \left(\frac{2 \frac{V_{p2}}{d_{h2}} - \frac{V_{p1}}{d_{h1}} - \frac{V_{p3}}{d_{h3}}}{\left(\frac{V_{p1}}{d_{h1}} + \frac{V_{p2}}{d_{h2}} + \frac{V_{p3}}{d_{h3}} \right) d_{h-v} \sin \theta} \right) \\ F = \frac{d_{h-v} \left(\frac{V_{p1}}{d_{h1}} + \frac{V_{p2}}{d_{h2}} + \frac{V_{p3}}{d_{h3}} \right)}{3 \sin \varphi} \end{cases} \quad (8)$$

2 实验结果

2.1 切向力标定

由式(8)可知,三维力传感器要实现力信息检测,需要对 4 个模型参数 d_{h1} 、 d_{h2} 、 d_{h3} 、 d_{h-v} 进行标定。在标定过程中,使用 AIGU 指针式推拉力计测定加载外力大小,通过电荷放大器的输出电压信号获得 3 个 PVDF 敏感单元上外力加载后对应的感知信号。考虑到 PDMS 是弹性体,突然加载外力会导致一定的振荡,导致测量结果误差。为减小误差,需首先给 PDMS 施加一个 2 N 左右的

静态力^[19],由于PVDF压电薄膜只对动态力敏感,因此静态力不会影响测量结果。标定示意图如图5所示,图5中 F_{h1} 、 F_{h2} 、 F_{h3} 分别为沿 P_1 、 P_2 、 P_3 方向的切向力, F_v 为垂直于 XOY 平面(半球底面)的法向力。

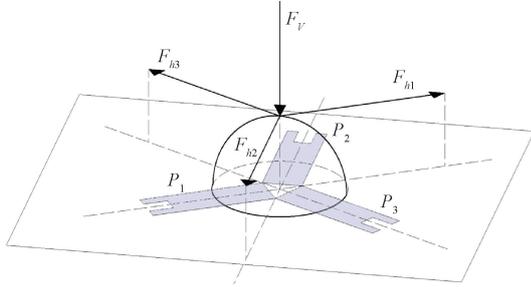
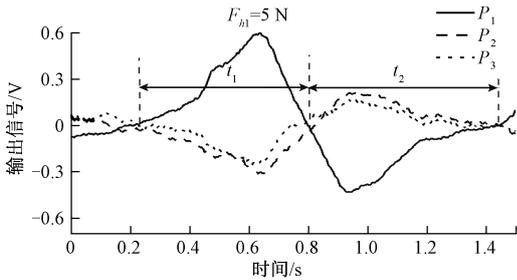


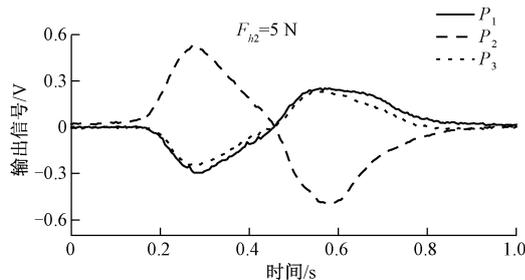
图5 标定示意图

Fig. 5 Calibration diagram

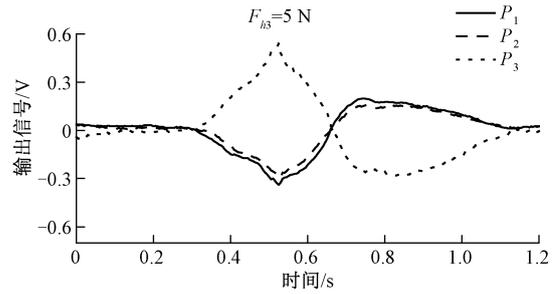
图6为给三维力传感器施加不同方向、大小为5 N的切向力 F_{hi} ($i=1,2,3$)时, P_1 、 P_2 、 P_3 上压电信号输出波形图。以 F_{h1} 切向力作用为例,由图4的受力分析可知,当施加 F_{h1} 时, P_1 受到向上的拉力作用, P_2 和 P_3 受到向下的压力作用。由于PVDF上电极接地,当产生压缩形变时电荷放大器输出负电压,而产生拉伸形变时电荷放大器则输出正电压,因此,当施加 F_{h1} 切向力时, P_1 输出正电压, P_2 和 P_3 输出负电压如图6中的 t_1 时间段所示。当 F_{h1} 切向力撤去后,由于PDMS的柔弹性,导致 P_1 产生压缩形变, P_2 和 P_3 产生拉伸形变,因此 P_1 输出负电压, P_2 和 P_3 输出正电压如图6中的 t_2 时间段所示。在 F_{h2} 、 F_{h3} 作用时, P_1 、 P_2 和 P_3 对应的电荷放大器输出电压波形可以类似的解释。



(a) F_{h1} 为5 N时传感器输出电压波形图
(a) Output voltage waveforms on sensor for 5 N tangential force F_{h1}



(b) F_{h2} 为5 N时传感器输出电压波形图
(b) Output voltage waveforms on sensor for 5 N tangential force F_{h2}



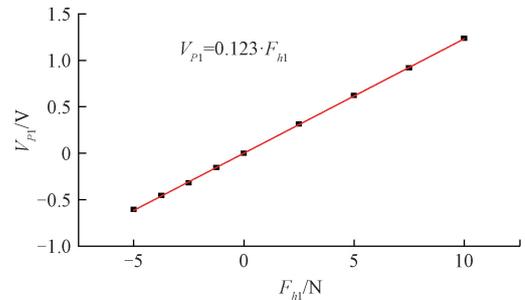
(c) F_{h3} 为5 N时传感器输出电压波形图
(c) Output voltage waveforms on sensor for 5 N tangential force F_{h3}

图6 分别加载5 N切向力 F_{h1} 、 F_{h2} 、 F_{h3} 时 P_1 、 P_2 和 P_3 上输出电压波形图

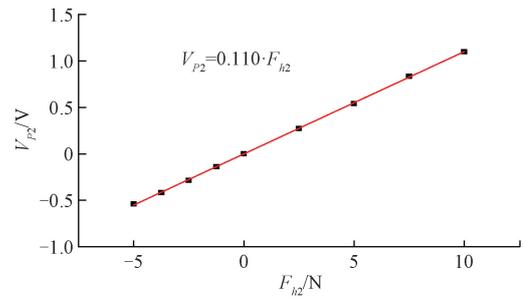
Fig. 6 Output voltage waveforms on P_1 , P_2 and P_3 for 5 N tangential force F_{h1} , F_{h2} , F_{h3}

为了得出输出电压与加载力间的关系曲线,外力从2.5 N起,每次增加2.5 N,一直增加到10 N,每个测试点重复5次,记录3个敏感单元输出信号的电压峰值,取5次测试的平均值作为最终输出结果,从而拟合出式(8)中参数值。

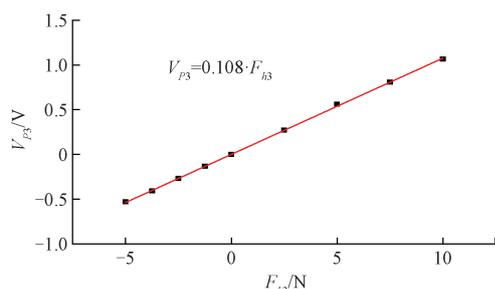
图7给出了 F_{h1} 、 F_{h2} 、 F_{h3} 在不同加载外力下输出信号电压峰值与外力之间的关系曲线。由式(5)和式(6)可知,线性拟合表达式为 $V_{pi} = d_{hi} \cdot F_{hi}$,故三维力传感器切向标定参数 $d_{h1} = 0.123$, $d_{h2} = 0.110$, $d_{h3} = 0.108$ 。



(a) V_{p1} 与切向力的关系
(a) Relationships between V_{p1} and the tangential force



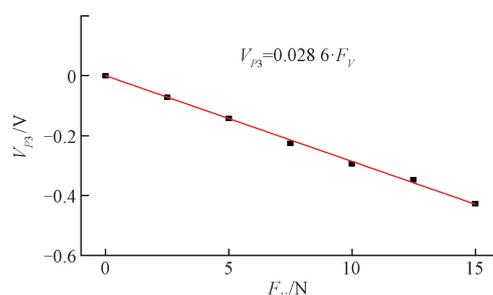
(b) V_{p2} 与切向力的关系
(b) Relationships between V_{p2} and the tangential force



(c) V_{P3} 与切向力的关系
(c) Relationships between V_{P3} and the tangential force

图7 在切向力作用下 P_1 、 P_2 和 P_3 敏感单元输出电压峰值与力的关系

Fig. 7 Relationships between the output voltage peak and the forces under the tangential force for P_1 , P_2 and P_3 sensitive units



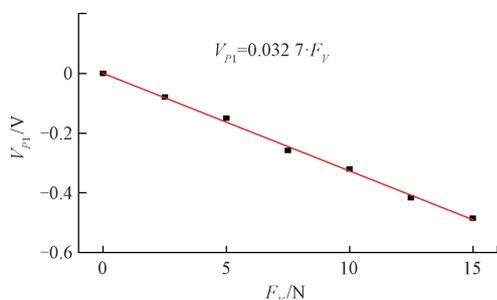
(c) V_{P3} 与法向力的关系
(c) Relationships between V_{P3} and the normal force

图8 在法向力作用下 P_1 、 P_2 和 P_3 敏感单元输出电压峰值与力的关系

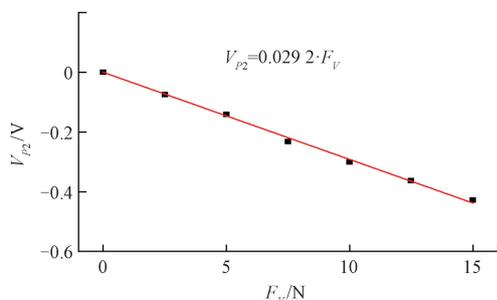
Fig. 8 Relationships between output voltage peak and forces under the normal force for P_1 , P_2 and P_3 sensitive units

2.2 法向力标定

类似地,在 PDMS 半球顶部先施加 2 N 静电力,再施加法向力 F_v (如图 5 所示),外力加载方法与大小及输出电压信号测试方法与切向力标定相同。在法向力 F_v 作用下,3 个敏感单元上输出电压信号峰值与外力之间的关系曲线如图 8 所示。通过线性拟合可得,三维力触觉传感器法向标定参数 $d_{v1} = -0.0327$, $d_{v2} = -0.0292$, $d_{v3} = -0.02086$ 。



(a) V_{P1} 与法向力的关系
(a) Relationships between V_{P1} and the normal force



(b) V_{P2} 与法向力的关系
(b) Relationships between V_{P2} and the normal force

在测试结果中发现法向比切向标定参数小,这是因为 PDMS 半球受切向力时,半球底面的边缘部分为主要受力点,即力主要集中在 PVDF 敏感单元上。当 PDMS 半球受到法向力时,主要受力部分为半球底面的中心,但敏感单元在中心部分的面积较小,所以法向相对切向标定参数小。3 个敏感单元切向标定参数与法向标定参数之比分别为 -3.768 、 -3.767 和 -3.776 ,取其平均值作为法向标定参数得 $d_{h-v} = -3.768$ 。

2.3 三维力传感器测试

标定式(8)中切向和法向模型参数后,三维力传感器可进行受力测试。采用如图 9 所示的外力加载装置,利用可调辅助夹座调整角度,将万用板基底固定在夹座的夹具上,用夹具角度的变化来代替加载力的 φ 角的变化。对三维力传感器施加 5~15 N 不同方向的力,同时改变 φ 值,记录加载数据和测试数据,根据式(9)计算误差,结果如表 1 所示。

由测试结果误差计算公式:

$$\delta = \frac{|\text{真值} - \text{测量值}|}{\text{真值}} \times 100\% \quad (9)$$

根据测量数据表明,计算值 θ 与加载值 θ 的最大误差为 12.89%,平均误差为 7.75%;计算值 φ 与加载值 φ 的最大误差为 13.3%,平均误差为 12.17%;计算值 F 与加载值 F 的最大误差为 10%,平均误差为 7.48%。分析表 1 可知计算 φ 时,施加力的方向越接近水平,误差越大; F 越小,误差越大。可能是由于为了简化算法,用 3 个阵元 d_{h-v} 的平均值代替各自的 d_{h-v} 。

表1 三维力加载数据与测试数据

Table 1 Three-dimensional force loading data and test data

测试次数	θ			ϕ			F		
	加载值/(°)	测试值/(°)	误差/%	加载值/(°)	测试值/(°)	误差/%	加载值/N	测试值/N	误差/%
1	0	-8.7	-	30	25.8	14.00	10.0	10.6	6.00
2	45	39.2	12.89	60	53.2	11.33	5.0	5.4	8.00
3	90	82.4	8.44	45	39.0	13.30	7.5	6.9	8.00
4	135	119.3	11.63	15	12.3	18.00	12.5	13.4	7.20
5	180	162.1	9.94	30	34.2	14.00	5.0	4.5	10.00
6	225	218.9	2.71	60	55.2	8.00	15.0	15.7	4.67
7	270	261.5	3.15	45	41.8	7.11	5.0	5.3	6.00
8	315	332.3	5.49	75	83.7	11.60	10.0	9.0	10.00

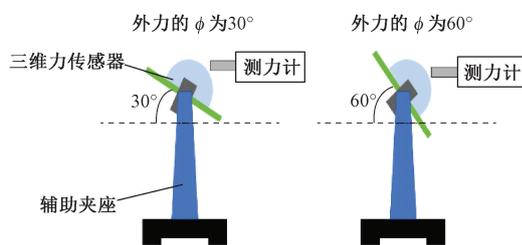


图9 外力加载装置

Fig. 9 Setup diagram of loading external forces

3 结 论

采用PVDF压电薄膜设计制作了仅包含3个敏感单元的柔性三维力传感器,通过分析传感器在外力 F 作用下PVDF敏感单元上的受力情况,再结合压电方程推导出三维力算法。区别于传统的四棱台结构,采用直径为3 cm的PMDS半球凸块作为传导力的介质,并对该三维力传感器算法模型参数进行了标定。针对施加5 N至15 N大小、方向不同的外力,对三维力传感器进行测试验证。测试结果表明,三维力传感器能有效检测出施加外力的大小和方向, θ 的平均误差为7.75%, ϕ 的平均误差为12.17%,力 F 的平均误差为7.48%。

参考文献

- [1] WANG J, JIANG J, ZHANG C, et al. Energy-efficient, fully flexible, high-performance tactile sensor based on piezotronic effect: Piezoelectric signal amplified with organic field-effect transistors[J]. *Nano Energy*, 2020, 76: 105050.
- [2] LU C H, SHAIKH M O, LIU H Y, et al. Piezoresistive tactile sensor with tongue pressure measurement capability for dysphagia assessment[J]. *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-Taiwan)*, 2020: 1-2.
- [3] YU J, HOU X, CUI M, et al. Highly skin-conformal wearable tactile sensor based on piezoelectric-enhanced triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2019, 64: 103923.
- [4] 赵海文,王曼菲,刘吉晓,等. 基于双电层电容的柔性触觉传感器机理研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(2): 25-32.
- [5] ZHAO H W, WANG M F, LIU J X, et al. Research on the mechanism of flexible tactile sensor based on electric double layer capacitance [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(2): 25-32.
- [6] MAITY K, GARAIN S, HENKEL K, et al. Self-powered human-health monitoring through aligned PVDF nanofibers interfaced skin-interactive piezoelectric sensor [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2020, 2(2): 862-878.
- [7] JIN T, PAN Y, JEON G, et al. Ultrathin nanofibrous membranes containing insulating microbeads for highly sensitive flexible pressure sensors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(11): 13348-13359.
- [8] SAHA S, YAUVANA V, CHAKRABORTY S, et al. Synthesis and characterization of polyvinylidene-fluoride (PVDF) nanofiber for application as piezoelectric force sensor[J]. *Materials Today-Proceedings*, 2019, 18(3): 1450-1458.
- [9] MAKINO H, NAKATSUMA K, IGASAKI T, et al. Biological signal measurements for automatic driving system by PZT/PZT sol-gel composite [M]. *IEEE International Ultrasonics Symposium, NEW YORK: IEEE*, 2019, 2628-2630.
- [10] LI S, ZHAO X, BAI Y, et al. Fabrication technology and characteristics research of the acceleration sensor

- based on Li-Doped ZnO piezoelectric thin films [J]. *Micromachines*, 2018, 9(4): 178.
- [10] SINGH E, SINGH P, KIM K S, et al. Flexible molybdenum disulfide (MoS₂) atomic layers for wearable electronics and optoelectronics [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(12): 11061-11105.
- [11] DUTTA B, KAR E, BOSE N, et al. NiO@SiO₂/PVDF: A flexible polymer nanocomposite for a high performance human body motion-based energy harvester and tactile e-skin mechanosensor[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(8): 10505-10516.
- [12] YAO T, GUO X, LI C, et al. Highly sensitive capacitive flexible 3D-force tactile sensors for robotic grasping and manipulation [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(44): 445109.
- [13] SUN X, SUN J, LI T, et al. Flexible tactile electronic skin sensor with 3D force detection based on porous CNTs/PDMS nanocomposites [J]. *Nano-Micro Letters*, 2019, 11(1).
- [14] LIU Y, WO H, HUANG S, et al. A flexible capacitive 3D tactile sensor with cross-shaped capacitor plate pair and composite structure dielectric [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 1378-1385.
- [15] ZHU Y, JIANG S, XIAO Y, et al. A flexible three-dimensional force sensor based on PI piezoresistive film[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(23): 19830-19839.
- [16] 潘奇,万舟,易士琳. 基于 PVDF 的三维力机器人触觉传感器的设计 [J]. *传感技术学报*, 2015, 28(5): 648-653.
PAN Q, WAN ZH, YI SH L. Design of three-dimensional force robot tactile sensor based on PVDF [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2015, 28(5): 648-653.
- [17] 魏健雄,万舟,单阳,等. 基于 PVDF 的三维指尖力传感器设计 [J]. *传感器与微系统*, 2019, 38(6): 102-104.
WEI J X, WAN ZH, SHAN Y, et al. Design of three-dimensional fingertip force sensor based on PVDF [J]. *Sensors and Microsystems*, 2019, 38(6): 102-104.
- [18] CHENG X, GONG Y, LIU Y, et al. Flexible tactile sensors for dynamic triaxial force measurement based on piezoelectric elastomer [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(7): 75007.
- [19] KE A, HUANG J, CHEN L, et al. Fingertip tactile sensor with single sensing element based on FSR and PVDF [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11100-11112.

作者简介



张艳芳,2016年于中国农业大学获得学士学位,现为华南理工大学硕士研究生,主要研究方向为信号采集与系统集成。

E-mail: 202020159091@mail.suct.edu.cn

Zhang Yanfang received her B. Sc. degree from China Agricultural University in 2016.

She is currently a master student at South China University of Technology. Her current research interests include signal acquisition and system integration.



刘玉荣(通信作者),1991年于江西大学获得学士学位,1996年于四川大学获得硕士学位,2007年于华南理工大学获得博士学位,现为华南理工大学教授,主要研究方向包括薄膜晶体管及其集成技术、传感器与信息感知技术、可穿戴柔性电子器件与系统集成等。

E-mail: phlyr@scut.edu.cn

Liu Yurong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangxi University in 1991, received his M. Sc. degree from Sichuan University in 1996, and received his Ph. D. degree from South China University of Technology in 2007. He is currently a professor at South China University of Technology. His main research interests include thin film transistor and its integration technology, sensor and information perception technology, wearable flexible electronic device and system integration, etc.