

DOI: 10.3724/SP.J.1187.2013.00057

三维力柔性触觉传感器电极研究与实验*

黄英^{1,2} 缪伟¹ 李雷鸣¹ 蔡文婷¹ 杨庆华¹ 葛运建²

(1. 合肥工业大学电子科学与应用物理学院 合肥 230009; 2. 中国科学院合肥智能机械研究所 合肥 230031)

摘要: 为了实现机器人智能皮肤对三维力的探测, 基于炭黑/碳纳米管/硅橡胶的表面压阻效应, 设计了 2 种不同排布的对称结构的四叉指电极三维力柔性触觉传感器。理论分析了这 2 种三维力传感器的工作原理, 并对这 2 种结构的传感器进行了量程、灵敏度、线性度等实验对比, 实验证明四电极方形排布的传感器在剪切力方向拥有更高的灵敏度和更好的线性度, 但量程相对十字形排布的传感器较小。通过三维力实验表明, 这 2 种新型的三维力柔性触觉传感器均具备检测三维力的功能, 可在机器人皮肤等实际应用场合, 根据工作量程和灵敏度的不同要求来选择传感器结构。

关键词: 触觉传感器; 三维力; 力敏导电橡胶; 机器人皮肤

中图分类号: TP212; TN9 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Research and experiment of electrodes for 3D force flexible tactile sensor

Huang Ying^{1,2} Miao Wei¹ Li Leiming¹ Cai Wenting¹ Yang Qinghua¹ Ge Yunjian²

(1. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Intelligence Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to realize 3D force detection of intelligent robot skin, and based on surface piezoresistive effect of carbon black/carbon nanotubes/silicone rubber, two 3D force flexible tactile sensors with different arrangement and four interdigitated electrodes with symmetrical structure are designed in this paper. The working principle of two 3D force tactile sensors is theoretically analyzed, and the experiment results of measurement range, sensitivity and linearity of these two structure sensors have been compared. The experimental results show that the sensor with four electrodes squared arrangement has a higher sensitivity and better linearity in shear force direction, but the measurement range is smaller than that of the sensor with four electrodes cross-shaped arrangement. The 3D force experimental results show that these two kinds of new 3D force flexible tactile sensors have the function of 3D force detection. In practical application such as robot skin, different structures of the sensor can be selected according to the different requirements of working range and sensitivity.

Keywords: tactile sensor; 3D force; force sensitive conductive rubber; robot skin

1 引言

随着机器人技术的发展, 触觉传感器的研究已受到越来越多的关注。目前对单维力传感器的研究较为成熟, 但是作为机器人的智能皮肤, 不仅需要传感器能实现对表面垂直压力的检测, 同时也需要传感器能够检测水平方向的剪切力。如机器人握持物体时, 需要感知切向力, 同时感知正向压力。当机器人接触一些表面不规则的物体时, 需要

实现三维方向甚至多维方向力的探测。三维力触觉传感器的研制已经成为智能机器人技术的一个重要研究领域。

目前国内外已经研制出多种三维力传感器, 用于机器人皮肤。日本的 Van A H 等人利用 MEMS 技术在十字梁结构上黏贴压敏薄膜电阻的方式制成了用于机器人手指的三维力触觉传感器^[1]; 台湾国立成功大学的 Huang 等人利用弯曲的铂/钛薄膜, 将其一段固定并布置成十字梁结构, 制成了用于检测垂

收稿日期: 2012-11 Received Date: 2012-11

*基金项目: 国家自然科学基金(61072032)、国家 863 计划(2007AA04Z220)资助项目

直力和剪切力的触觉传感器^[2]；台湾国立清华大学的 Su 等人在硅基体上生成各向异性的碳纳米管，并将其转移并旋图到 PDMS 上制成了可检测垂直力和剪切力的柔性触觉传感器^[3]；Chen 等人以 PDMS 和 PET 为基体材料，ITO 作为电极制成了可检测垂直和剪切力的柔性电容式触觉传感器^[4]；中科大合肥智能机械研究所的徐菲等人以炭黑/硅橡胶为基体材料，并在材料内部上下层布线成十字交叉结构，制成了三维力柔性触觉传感器，实现了对三维力的检测^[5]。

国内外的一些研究表明，一些高分子聚合物材料已经大量地应用于柔性传感器中，如炭黑/硅橡胶、炭黑/PDMS 等材料。但是这些传感器大多是通过 MEMS 工艺制造，这种工艺主要在硅片上进行，工艺复杂、成本高，这种 MEMS 传感器缺乏柔性和弹性且容易损坏。本文基于炭黑/碳纳米管/硅橡胶的表面压阻效应，提出了 2 种不同结构的可检测三维力的柔性触觉传感器，这两种传感器均采用四叉指电极对称结构，能减小体压阻效应的影响，增强传感器的稳定性。这 2 种传感器制作方便，柔韧性强，不易损坏，且拥有不同的量程和灵敏度，能作为机器人皮肤应用于不同的场合。

2 力敏导电橡胶的压阻特性

力敏导电橡胶具有良好的柔性和压阻效应，是机器人智能皮肤柔性传感器的好材料，在硅橡胶中填充不同种类和不同比例的导电填料将拥有不同的压阻特性。本文采用 4% 的碳纳米管和 6% 的炭黑作为导电填料，炭黑/碳纳米管/硅橡胶具有良好的体压阻效应和表面压阻效应。Karsten W^[6]等人研究发现：表面压阻效应与体压阻效应共同作用时，表面压阻效应占主导，体压阻效应的影响可以忽略。本文提出的柔性三维力传感器均基于炭黑/碳纳米管/硅橡胶的表面压阻效应，忽略了体压阻效应。

3 三维力柔性触觉传感器结构设计及解析

3.1 三维力传感器结构设计

3.1.1 叉指电极

图 1(a)所示，叉指电极结构已经被广泛地应用于传感器领域，对于单个叉指结构的传感器电阻 R 由两部分组成：表面接触电阻 R_s 和体电阻 R_v 。叉指电

极结构设计可减小 R_v ，以单个叉指的等效电路举例说明：从图(b)可知 R_v 为 4 个电阻(2 个 R_1 、 R_2)的并联电阻值：

$$\frac{1}{R_v} = \frac{2}{R_1} + \frac{2}{R_2} \tag{1}$$

电极中的叉指数越多，则并联的电阻数越多， R_v 越小， R 也越小。由于传感器的压阻效应中表面压阻效应起主要作用，而叉指电极结构进一步减少了传感器的体电阻，从而减小了体压阻效应的影响，增加了传感器的稳定性。

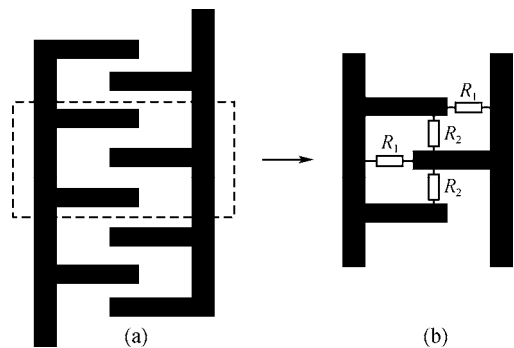


图 1 叉指电极结构与单个叉指的等效电阻
Fig.1 Interdigitated electrode structure and sensor's equivalent resistance with one interdigitated electrode

3.1.2 三维力传感器电极设计

合肥工业大学的陆伟等人以炭黑/硅橡胶为基体材料设计了一种对称结构的四电极式柔性三维力触觉传感器^[7]。本文基于炭黑/碳纳米管/硅橡胶的压阻效应，对这种四电极传感器的结构和材料进行了优化和改进，设计了 2 种不同的四叉指电极式的新型柔性三维力传感器，如图 2 所示。

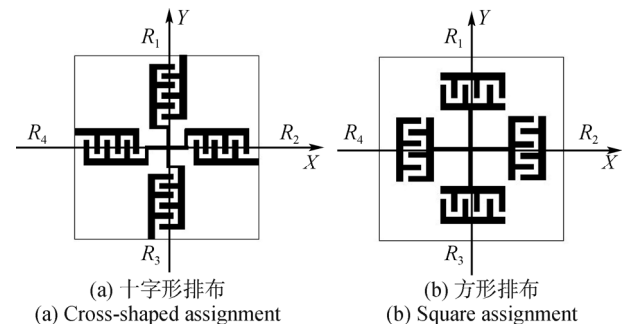


图 2 四叉指电极式三维力传感器设计
Fig. 2 Design of 3D force sensor with four interdigitated electrodes structure

图 2 为 2 种四叉指电极式三维力触觉传感器的电极分布，其等效电路，如图 3 所示。令这 2 种结构

的传感器分别为 S_1 、 S_2 。传感器 S_1 的四个叉指电极均沿轴向分布, 成十字交叉结构, 如图 2(a)所示。传感器 S_2 的四个叉指电极围城一个正方形, 如图 2(b)所示。

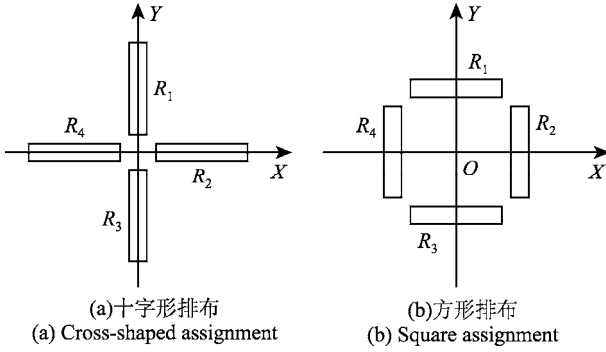


图 3 三维力传感器等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of 3D force sensor

将上述电极结构制作作为柔性印刷电路板, 每个敏感单元大小为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$, 并设计成阵列形式, 利用导电银胶将制备好的炭黑/碳纳米管/硅橡胶材料粘贴在叉指电极敏感区域, 得到图 4 所示的柔性三维力传感器阵列。

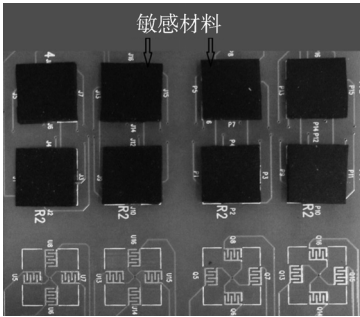


图 4 2 种结构的传感器阵列(2×2)

Fig. 4 Sensor array (2×2) of two kinds of structure

3.2 三维力解析

为了检测三维力, 在三维力传感器上方设置一个质地较硬的聚乙烯材料制成的方形保护层, 起到传递受力的作用。其受力后产生位移, 导致下方接触的力敏导电橡胶产生形变, 从而使电阻 $R_1 \sim R_4$ 各自发生相应的变化。假设力敏导电橡胶为理想材料, 4 个电极间的接触状态均相同, 即可认为 $R_1=R_2=R_3=R_4$ 。本文定义 F_x 、 F_y 、 F_z 的正方向分别沿 x 轴的正向、 y 轴的正向和 z 轴的负向。对于这 2 种电极不同排布的单个传感器单元 S_1 、 S_2 , 当有垂直压力 F_z 作用于传感器时, 4 个电阻均受到挤压, 由于导电橡胶的表面压阻效应使得 4 个电阻的阻值均减小 $\Delta R_1^z \sim \Delta R_4^z$ 。而 X

方向的作用力 F_x 使传感头产生绕 y 轴的旋转力矩, 电阻 R_2 受到挤压, 使得 R_2 减小 ΔR_2^x , R_4 受到拉伸, 使得 R_4 增大 ΔR_4^x , R_1 、 R_3 由于对称, 表面压阻变化基本抵消, 消除了 X 方向力的影响。 Y 方向的作用力 F_y 使得 R_1 减小 ΔR_1^y , R_3 增大 ΔR_3^y , R_2 、 R_4 由于结构对称, 表面压阻变化基本抵消, 故不受 Y 方向作用的影响。这两种结构设计使得 X 方向的电阻不受 Y 方向力的影响, Y 方向的电阻不受 X 方向力的影响, 消除了传感器在剪切力间的相互干扰。

由上述分析可得:

$$\Delta R_1/R_1 = \Delta R_1^y/R_1 + \Delta R_1^z/R_1 \quad (2)$$

$$\Delta R_2/R_2 = \Delta R_2^x/R_2 + \Delta R_2^z/R_2 \quad (3)$$

$$\Delta R_3/R_3 = \Delta R_3^y/R_3 + \Delta R_3^z/R_3 \quad (4)$$

$$\Delta R_4/R_4 = \Delta R_4^x/R_4 + \Delta R_4^z/R_4 \quad (5)$$

则三维力 $\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$ 作用引起的传感器电阻变化可表示为:

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = k_i F_i \quad (6)$$

式中: $i=X, Y$ 或 Z ; k_i 为 X, Y 或 Z 方向的电阻系数。

因为传感器的 4 个电极呈对称结构, 所以:

$$\Delta R_x/R_x = \Delta R_2^x/R_2 = -\Delta R_4^x/R_4$$

$$\Delta R_y/R_y = \Delta R_1^y/R_1 = -\Delta R_3^y/R_3$$

$$\Delta R_z/R_z = \Delta R_1^z/R_1 = \Delta R_2^z/R_2 = \Delta R_3^z/R_3 = \Delta R_4^z/R_4 \quad (7)$$

$$\text{由式(2)~(4)得: } \Delta R_x/R_x = \frac{\Delta R_2/R_2 - \Delta R_4/R_4}{2} \quad (8)$$

$$\text{由式(3)~(5)得: } \Delta R_y/R_y = \frac{\Delta R_1/R_1 - \Delta R_3/R_3}{2} \quad (9)$$

由式(2)+(3)+(4)+(5)得:

$$\Delta R_z/R_z = \frac{\Delta R_1/R_1 + \Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 + \Delta R_4/R_4}{4} \quad (10)$$

将式(8)、式(9)、式(10)代入式(6)得:

$$k_x F_x = \frac{\Delta R_2/R_2 - \Delta R_4/R_4}{2}$$

$$k_y F_y = \frac{\Delta R_1/R_1 - \Delta R_3/R_3}{2} \quad (11)$$

$$k_z F_z = \frac{\Delta R_1/R_1 + \Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 + \Delta R_4/R_4}{4}$$

式中: k_x 、 k_y 、 k_z 分别为三维力传感器对于力 F_x 、 F_y 、 F_z 的电阻系数。将实验数据 $\Delta R_i/R_j$ ($j=1, 2, 3, 4$) 代入式(6)即可求得 F_x 、 F_y 、 F_z , 将此 3 个分量叠加即为三维力 \vec{F} 。

定义传感器 3 个方向的灵敏度 S_i :

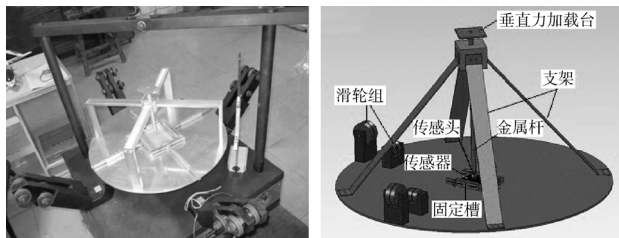
$$S_i = \frac{\Delta R_i / R_i}{F_i} = k_i \quad (12)$$

式中: $i=X, Y$ 或 Z 。

4 实验与讨论

4.1 三维力标定装置

三维力实验采用本项目研制的砝码式三维力加载平台, 如图 5 所示。在图 5(b)中的垂直力加载台放置砝码, 通过下方的竖直金属杆将砝码的重力传递到传感头的顶部, 传感头将所受的压力均匀作用到整个三维力传感器单元的表面上, 从而实现对三维力传感器 F_z 的加载^[8-16]。用一根细绳一端衔接传感头顶部; 另一端悬挂砝码, 通过定滑轮将垂直方向上砝码的重力转化为水平方向上作用于传感头顶部的拉力, 从而实现 F_x 或 F_y 的加载。同时, 为防止加载 F_x 或 F_y 时传感头在力敏导电橡胶表面间产生滑移预先在传感头顶部施加了一个正向压力。



(a) 实物 (a) Photo of platform (b) 结构示意图 (b) Schematic diagram of structure

图 5 三维力加载平台

Fig.5 3D force loading platform

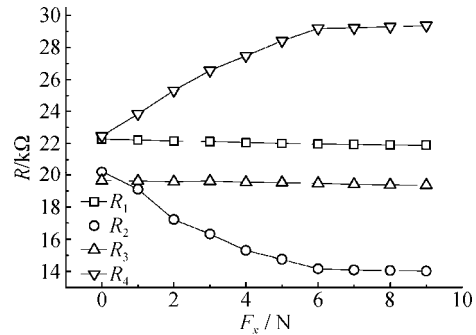
4.2 三维力标定实验

4.2.1 传感器 S_1 的标定实验

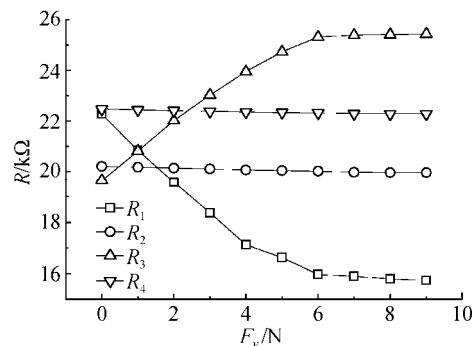
对传感器 S_1 分别加载 F_x 、 F_y 及 F_z , 记录 $R_1 \sim R_4$ 的阻值, 实验数据, 如图 6 所示。

观察图 6(c)可知, 传感器 S_1 检测 F_z 的有效量程为 0~8 N, 当 F_z 超过 8 N 后, $R_1 \sim R_4$ 的阻值变化量明显减小。分析可知, F_z 在 0~8 N 内时 $R_1 \sim R_4$ 的阻值变化主要由力敏导电橡胶与接触电极间的表面压阻效应引起, 当 F_z 达到 8 N 时力敏导电橡胶与电极间的接触已基本达到饱和状态, 继续增大 F_z 导致阻值的变化则主要由导电橡胶的体压阻效应引起, 由于体压阻效应变化微小, 又指电极的结构设计又进一步减小了体压阻效应的影响, 故可忽略体压阻效应。观察图 6(a)和(b)可知, 传感器 S_1 检测 F_x 和 F_y 的有效量程

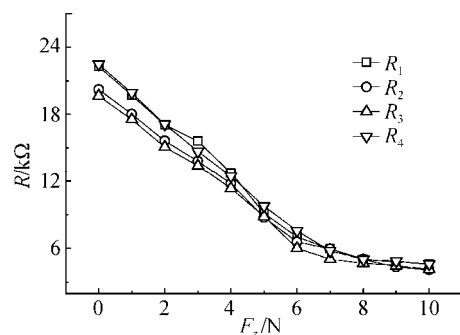
为 0~6 N, 当 F_x 超过 6 N 后, R_2 、 R_4 的阻值基本不变, 当 F_y 超过 6 N 后 R_1 、 R_3 基本不变。同时在加载 F_x 时, R_1 、 R_3 电阻几乎不变, 加载 F_y 时, R_2 、 R_4 阻值也几乎不变。从图 6 可知, 分别加载 F_x 、 F_y 、 F_z , $R_1 \sim R_4$ 的阻值变化规律与三维力传感器受力电阻变化的理论分析相同, 说明该设计合理, 能用于三维力检测。



(a) $R_1 \sim R_4$ 与 F_x 的变化关系 (a) The relationship of F_x and of $R_1 \sim R_4$



(b) $R_1 \sim R_4$ 与 F_y 的变化关系 (b) The relationship of F_y and of $R_1 \sim R_4$



(c) $R_1 \sim R_4$ 与 F_z 的变化关系 (c) The relationship of F_z and of $R_1 \sim R_4$

图 6 传感器 S_1 实验数据

Fig. 6 Experimental data of sensor S_1

重复上述实验, 将传感器 S_1 有效量程段内(F_x 、 F_y 的量程为 0~6 N, F_z 的量程为 0~8 N)的实验数据通过式(6)转化为 $F_i - \Delta R_i / R_i$ ($i=x, y, z$), 结果如图 7 所示。

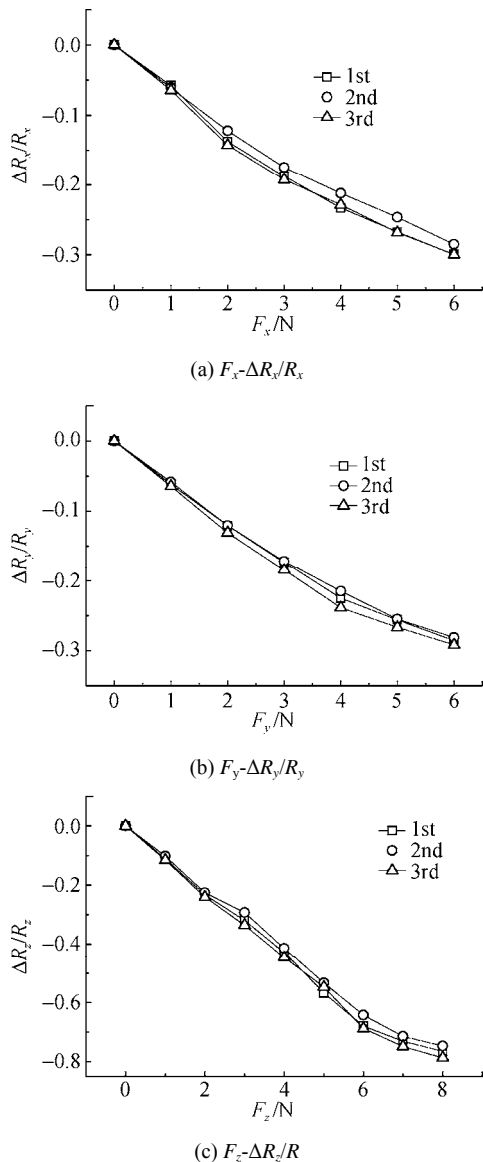


图 7 传感器 S_1 实验数据

Fig.7 Experimental data of sensor S_1

对图 7 中的数据作线性拟合, 该拟合斜率即为式(4)中的系数 k_i ($i=x, y, z$), 也即式(12)中的传感器的灵敏度。3 次实验结果如表 1 所示。

表 1 $F_i-\Delta R_i/R_i$ ($i=x, y, z$) 的拟合斜率与相关系数

Table 1 Fitting slope and correlation coefficient of $F_i-\Delta R_i/R_i$ ($i=x, y, z$)			
拟合斜率	实验 1	实验 2	实验 3
k_x/N^{-1}	-0.050 46	-0.046 98	-0.049 72
k_y/N^{-1}	-0.048 19	-0.047 48	-0.049 54
k_z/N^{-1}	-0.101	-0.098 24	-0.102 49
相关系数	实验 1	实验 2	实验 3
R_x^2	0.971 2	0.981 38	0.967 45
R_y^2	0.979 11	0.980 79	0.968 04
R_z^2	0.982 93	0.988 16	0.987 77

3 次实验结果取均值可得三维力传感器 S_1 的 F_x 、 F_y 及 F_z 的平均电阻系数即灵敏度为: $\bar{k}_x=-0.049\ 05\ N^{-1}$, $\bar{k}_y=-0.048\ 4\ N^{-1}$, $\bar{k}_z=-0.100\ 58\ N^{-1}$ 。

4.2.2 传感器 S_2 的标定实验

对传感器 S_2 分别加载 F_x 、 F_y 、 F_z , 记录 $R_1\sim R_4$ 的阻值, 实验数据如图 8 所示。

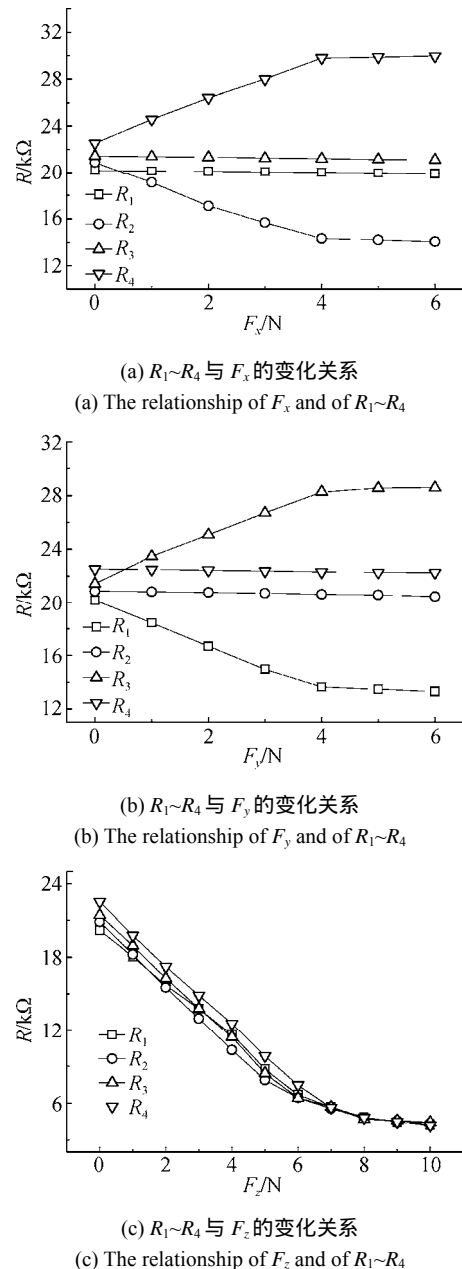


图 8 传感器 S_2 实验数据

Fig.8 Experimental data of sensor S_2

由图 8(c)可知, 传感器 S_2 检测 F_z 的有效量程为 0~8 N, 当 F_z 超过 8 N 后, $R_1\sim R_4$ 的阻值变化量明显减小。与传感器 S_1 相比, Z 方向电阻变化没有太大差别。观察图 8(a)

和(b)可知, 传感器 S_2 检测 F_x 和 F_y 的有效量程为 0~4 N, 当 F_x 超过 4 N 后, R_2 、 R_4 的阻值基本不变, 当 F_y 超过 4 N 后 R_1 、 R_3 基本不变。同时在加载 F_x 时, R_1 、 R_3 电阻几乎不变, 加载 F_y 时, R_2 、 R_4 阻值也几乎不变。从图 8 可知, 分别加载 F_x 、 F_y 、 F_z , $R_1 \sim R_4$ 的阻值变化规律与三维力传感器受力电阻变化的理论分析相同, 说明该设计合理, 能用于三维力的检测。

重复上述实验, 将传感器 S_2 有效量程段内(F_x 、 F_y 的量程为 0~4 N, F_z 的量程为 0~8 N)的实验数据通过式(6)转化为 $F_i-\Delta R_i/R_i (i=x, y, z)$, 结果如图 9 所示。

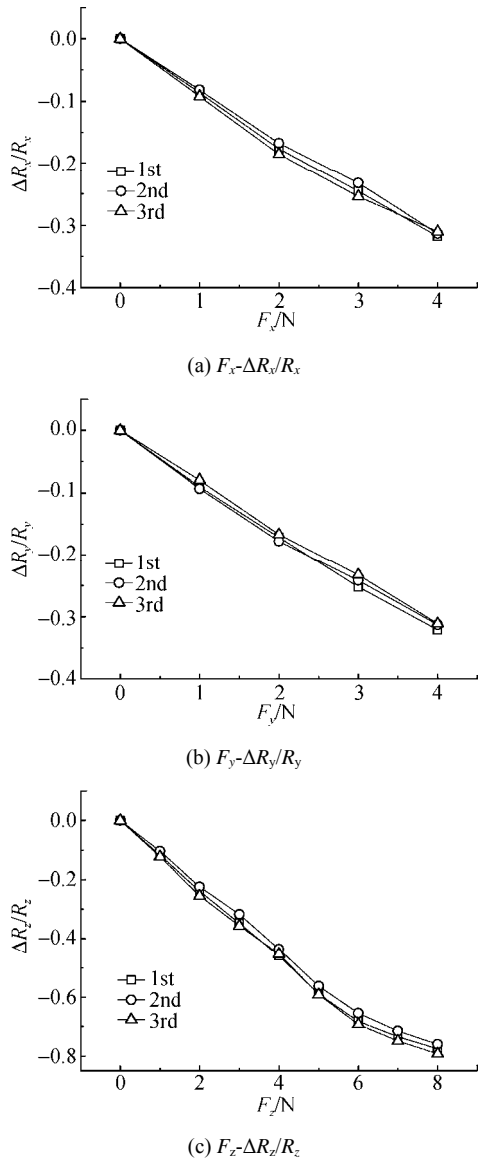


图 9 传感器 S_2 实验数据

Fig.9 Experimental data of sensor S_2

对图 9 中的数据作线性拟合, 该拟合斜率即为式(4)中的系数 $k_i (i=x, y, z)$, 也即式(12)中的传感器的

灵敏度。3 次实验结果如表 2 所示。

表 2 $F_i-\Delta R_i/R_i (i=x, y, z)$ 的拟合斜率和相关系数
Table 2 Fitting slope and correlation coefficient of $F_i-\Delta R_i/R_i (i=x, y, z)$

拟合斜率	实验 1	实验 2	实验 3
k_x/N^{-1}	-0.079 43	-0.077 69	-0.078 27
k_y/N^{-1}	-0.080 55	-0.077 47	-0.077 58
k_z/N^{-1}	-0.101 35	-0.099 64	-0.102 64
相关系数	实验 1	实验 2	实验 3
R_x^2	0.995 54	0.997 62	0.984 88
R_y^2	0.997 35	0.992 51	0.997 75
R_z^2	0.980 35	0.985 62	0.982 82

3 次实验结果取均值可得三维力传感器 S_2 的 F_x 、 F_y 及 F_z 的平均电阻系数即灵敏度为: $\bar{k}_x = -0.078 46 N^{-1}$, $\bar{k}_y = -0.078 53 N^{-1}$, $\bar{k}_z = -0.101 21 N^{-1}$ 。

4.3 实验讨论

上述实验数据表明传感器 S_1 检测 F_x 、 F_y 、 F_z 的量程分别为 0~6 N, 0~6 N, 0~8 N; 相对量程段内各自的平均灵敏度分别为 $\bar{k}_x = -0.049 05 N^{-1}$, $\bar{k}_y = -0.048 4 N^{-1}$, $\bar{k}_z = -0.100 58 N^{-1}$ 。传感器 S_2 检测 F_x 、 F_y 、 F_z 的量程分别为 0~4 N, 0~4 N, 0~8 N; 相对量程段内各自的平均灵敏度分别为 $\bar{k}_x = -0.090 19 N^{-1}$, $\bar{k}_y = -0.089 27 N^{-1}$, $\bar{k}_z = -0.101 21 N^{-1}$ 。对比可知, 传感器 S_1 与传感器 S_2 检测垂直力 F_z 的量程与灵敏度相差不大, 2 种结构对垂直力测量结果几乎一致。但是在检测剪切力时, 传感器 S_2 的电极设计使得相同剪切力作用下, 传感器单元所受的力矩比传感器 S_1 大, 压阻效应比 S_1 更明显, 因而传感器 S_2 在剪切力方向拥有更高的灵敏度, 但传感器 S_1 在剪切力方向有更大的量程。同时比较表 1 和表 2 中 2 种传感器的线性拟合相关系数可知, 在检测垂直力时, 2 种传感器线性度几乎一致; 但在检测剪切力时, 传感器 S_2 的电极分布使得其受力比 S_1 均匀, 从而传感器 S_2 的拟合线性度明显高于传感器 S_1 。

5 结 论

通过将三维力传感器设计成叉指电极结构, 进一步减小了力敏导电橡胶体压阻效应的影响, 增强了传感器的稳定性。将四叉指电极进行不同的排布设计成 2 种不同结构的三维力触觉传感器, 理论分析了这 2 种传感器检测三维力的工作原理, 并消除

了剪切 X 、 Y 方向之间力的相互干扰。实验对比表明传感器 S_2 在剪切力方向拥有更好的灵敏度和线性度, 传感器 S_1 在剪切力方向有更大的量程。三维力实验表明, 这 2 种新型的三维力柔性触觉传感器均具备检测三维力的功能, 可根据不同的应用场合, 选择不同量程和不同灵敏度的传感器结构, 应用于机器人皮肤等相关领域。

参考文献

- [1] VAN A H, DZUNG V D, SUSUMU S, et al. Design of a small-scale tactile sensor with three sensing points for using in robotic fingertips [J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010: 4855-4860.
- [2] HUANG Y M, TSAI N C, LAI J Y. Development of tactile sensors for simultaneous, detection of normal and shear stresses[J]. Sens. Actuators, A: Physical, 2010: 189-195.
- [3] SU W S, HU C F, LIN C M, et al. Development of a 3D distributed carbon nanotubes on flexible polymer for normal and shear forces measurement [J]. IEEE, 2010: 615-618.
- [4] CHEN T Y, WANG Y C, LO C Y, et al. A novel integrated transparent flexible tactile sensor [J]. IEEE Transducers Conference, 2011: 1052-1055.
- [5] 徐菲, 黄英, 丁俊香, 等. 一种新型三维力柔性阵列触觉传感器研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(11): 1542-1546.
XU F, HUANG Y, DING J X, et al. Research of a novel three-dimensional force flexible tactile sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(11): 1542-1546.
- [6] KARSTEN W, HEINZ W. The working principle of resistive tactile sensor cells [C]. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Canada, 2005: 471-476.
- [7] 黄英, 陆伟, 赵小文, 等. 用于机器人皮肤的柔性多功能触觉传感器设计与实验[J]. 机器人, 2011, 33(3): 347-353.
HUANG Y, LU W, ZHAO X W, et al. Design and experiment of flexible multi-functional tactile sensors for robot skin [J]. Robot, 2011, 33(3): 347-353.
- [8] LIU Y C, SUN C M, LIN L Y, et al. Development of a CMOS-based capacitive tactile sensor with adjustable sensing range and sensitivity using polymer fill-in [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20(1) : 119-127.
- [9] JEROEN M, ERWIN B. Flexible shear sensor based on embedded optoelectronic components [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011: 1-3.
- [10] 曹光辉, 黄英, 张武, 等. 三维柔性触觉传感器模型仿真及试验研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(2): 129-134.
CAO G H, HUANG Y, ZHANG W, et al. Simulation and experiment research of a 3D flexible tactile sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(2): 129-134.
- [11] 张军, 李寒光, 李映君, 等. 压电式轴上六维力传感器的研制 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 73-77.
ZHANG J, LI H G, LI Y J, et al. Development of piezoelectric six-axis force sensor on axis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 73-77.
- [12] 石海平, 冯洁, 陈翔, 等. 巨磁传感器对铁磁流体的动态检测 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1033-1037.
SHI H P, FENG J, CHEN X, et al. Dynamic detection of ferrofluid with giant magneto resistance sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1033-1037.
- [13] 徐一鸣, 左洪福, 詹志娟, 等. 基于灵敏度分析的静电传感器优化设计 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1084-1089.
XU Y M, ZUO H F, ZHAN ZH J, et al. Optimal design of electrostatic sensor based on sensitivity analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5): 1084-1089.
- [14] JAGODA A, DOBRZYNSKA, MARTIN A M, et al. Capacitive flexible force sensor [J]. Procedia Engineering, Science Direct, 2010: 404-407.
- [15] NODA K, IWASE E, MATSUMOTO K, et al. Stretchable liquid tactile sensor for robot-joints [J]. 2010 IEEE International conference on robotics and automation anchorage convention district, 2010: 4212-4217.
- [16] 兰天, 刘伊威, 陈养彬, 等. 机器人灵巧手基关节交叉耦合同步控制 [J]. 机器人, 2010, 32(2): 150-156.
LAN T, LIU Y W, CHEN Y B, et al. Synchronized cross-coupled control for base joint of dexterous robot hand [J]. Robot, 2010, 32(2): 150-156.

作者简介

黄英, 1960 年出生, 教授, 从事敏感材料和传感技术研究。
E-mail: hf.hy@163.com

Huang Ying was born in 1960, professor in Hefei University of Technology. Her main research direction is sensitive material and sensing technology.

缪伟, 1987 年出生, 毕业于合肥工业大学, 现为合肥工业大学电子科学与应用物理学院研究生, 主要研究方向为敏感材料和传感技术。

E-mail: willandy87@163.com

Miao Wei was born in 1987, graduated from Hefei University of Technology. Now he is a M.Sc. candidate in School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology. His main research direction is sensitive material and sensing technology.