

DOI: 10.3724/SP.J.1218.2011.00347

用于机器人皮肤的柔性多功能触觉传感器设计与实验

黄英^{1,2}, 陆伟¹, 赵小文¹, 廉超¹, 葛运建²

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

摘要:为实现智能机器人皮肤对三维力和温度的检测,设计并制作了一种柔性多功能触觉传感器.基于碳黑-硅橡胶显著的压阻效应设计了四电极对称结构的三维力传感器,基于碳纤维-PDMS(聚二甲硅氧烷)显著的温度敏感效应设计了叉指电极结构的温度传感器,分析了检测三维力和温度的工作原理.针对两种导电复合材料存在的力学/温度敏感特性交叉干扰问题,柔性多功能触觉传感器阵列采用三维力和温度传感器凹凸状交替排布的结构.实验结果表明,这种柔性多功能触觉传感器具备检测三维力及温度的功能,可应用于机器人的敏感皮肤.

关键词:多功能触觉传感器; 机器人皮肤; 三维力; 温度

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2011)-03-0347-07

Design and Experiment of Flexible Multi-Functional Tactile Sensors for Robot Skin

HUANG Ying^{1,2}, LU Wei¹, ZHAO Xiaowen¹, LIAN Chao¹, GE Yunjian²

(1. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Flexible multi-functional tactile sensors are designed and fabricated for intelligent robot skin to detect three-dimensional force and temperature. Using the significant piezoresistive effect of carbon black/silicone rubber, a three-dimensional force sensor with four-electrode symmetrical structure is designed. Using the significant temperature sensitive effect of carbon fiber-PDMS (polydimethylsiloxane), a temperature sensor with interdigitated electrode structure is designed. The principles of three-dimensional force and temperature detection are analyzed. In view of the themechanical/temperature sensitivity cross-interference of the two kinds of conductive composites, the flexible multi-functional tactile sensor array is structured in the way that three-dimensional force and temperature sensors are arranged in alternately concave-convex form. The experiment results prove that the flexible multi-functional tactile sensors have three-dimensional force and temperature detection functions and can be applied to robot sensitive skin.

Keywords: multi-functional tactile sensor; robot skin; three-dimensional force; temperature

1 引言 (Introduction)

目前,机器人敏感皮肤是智能机器人研究领域中的一个热点问题.智能机器人工作时不可避免地需要与各种物体接触,会遇到许多不可预知的障碍,这就需要机器人能很好地感知到触觉信息.为了适应这些需求,研究出类似人类皮肤的机器人敏感皮肤就显得尤为重要.

人的皮肤是一个很大的感觉器官,能感知触觉、痛觉等多种感觉,其中触觉的感知尤为重要.通过分布于表层皮肤中的迈斯纳触觉小体和皮肤深层的巴西尼环层小体等触觉感官器官接受外界刺激,并进行能量转换,把物理能量转换成神经化学能量,由与这些触觉小体相连接的传入神经传至大脑皮层的中央后回,即触觉皮质感受区,经分析综合产生触

觉.类似于人的皮肤,机器人敏感皮肤指的是大面积、柔软、带有数据处理能力的微型传感器阵列,可以覆盖在机器人表面,通过传感器感知外部环境.同时,不同于人的皮肤只能定性感知外部环境,机器人敏感皮肤可实现对外界物理量的定量检测.由于外部环境的复杂性,要求机器人敏感皮肤能检测多个物理量,因此用于机器人皮肤的触觉传感器的多功能化是现今机器人敏感皮肤研究领域的重点.日本东京大学 Someya 等人研制出内部含测量压力和温度的晶体管阵列式电子皮肤^[1].美国伊利诺斯州大学 Engel 等人利用微电子机械系统(MEMS)制作工艺,将识别材质、温度、力和硬度等材料特性的独立传感器件分布在聚合物内部,制备可识别物体性能的柔性多功能触觉敏感系统^[2].清华大学王璐

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61072032);国家863计划资助项目(2007AA04Z220).

通讯作者:黄英, hf.hy@163.com 收稿/录用/修回:2010-09-03/2011-01-23/2011-03-25

珩等人研究了可用于敏感皮肤的碳黑-硅橡胶的应力弛豫特性^[3]。

从国内外研究状况可知,目前尚无检测三维力/温度的柔性多功能触觉传感器的相关报道.因此,本文基于碳黑-硅橡胶显著的压阻效应设计了三维力传感器,基于碳纤维-PDMS (polydimethylsiloxane) 显著的温度敏感效应设计了温度传感器.为消除敏感材料的力学/温度敏感特性交叉干扰的影响,柔性多功能触觉传感器阵列采用三维力和温度传感器凹凸状交替排布的结构.分析了柔性多功能触觉传感器检测三维力和温度的工作原理,并构建了求解三维力和温度的数学模型.最后,通过三维力标定平台对三维力传感器进行标定,通过高低温实验箱检测了温度传感器的性能.

2 导电复合材料的压阻效应和温度敏感效应 (Conductive composites' piezoresistive effect and temperature sensitive effect)

目前,为满足机器人敏感皮肤柔性化的要求,一般采用柔性导电复合材料作为触觉传感器的敏感材料.高分子基体材料里填充不同的碳系导电填料(如碳黑、石墨、碳纤维等)可制备成具有力学或温度敏感特性的导电复合材料.本文选用碳黑-硅橡胶(填充碳黑质量分数为8%)作为力敏导电橡胶,碳纤维-PDMS(填充碳纤维质量分数为12%)作为温度敏感导电橡胶.

碳黑-硅橡胶具有显著的压阻效应,可作为力学敏感材料.压阻效应用来描述材料在受到机械式应力时所产生的电阻变化.力敏导电橡胶的压阻效应分为体压阻效应和表面压阻效应.其中,当力敏导电橡胶受到压力作用时,导电粒子体积不受压力影响,而橡胶具有可压缩性,因此随压力的增大,橡胶的体积分数减小从而导电粒子的体积分数增大,这就导致力敏导电橡胶的电阻率随压力增大而减小,这一现象即为力敏导电橡胶的体压阻效应.同时,力敏导电橡胶具有一定粗糙的表面,将其制作在电极上时橡胶表面与电极非完全接触,两者间存在一个表面接触电阻,接触电阻的大小受橡胶与电极间的接触程度影响.导电橡胶受力被压缩,导致微观下橡胶表面与电极进一步接触,从而两者间的接触面积增大,表面接触电阻减小;导电橡胶受力拉伸则导致橡胶表面与电极部分分离,两者间接触面积减小,表面接触电阻增大,上述现象即为力敏导电橡胶的表面压阻效应.

Weiss 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^[4].为验证上述结论,本文设计了图1(a)结构的传感器,其中a、b为2个5mm×5mm的面电极,c、d为2个面积可以忽略的点电极,a与b、c与d间的距离均为5mm.用导电银胶将力敏导电橡胶粘贴在图1(a)中的敏感区域.a、b间的电阻 R_1 由两部分组成,分别为力敏导电橡胶表面与面电极a、b间的接触电阻 R_s 和电极a、b间的力敏导电橡胶的体电阻 R_v ,即 $R_1 = 2R_s + R_v$,如图1(b)所示.而电极c、d的面积可以忽略,因此不存在表面接触电阻,c、d间的电阻 R_2 只包括力敏导电橡胶的体电阻 R_v^* ,即 $R_2 = R_v^*$.

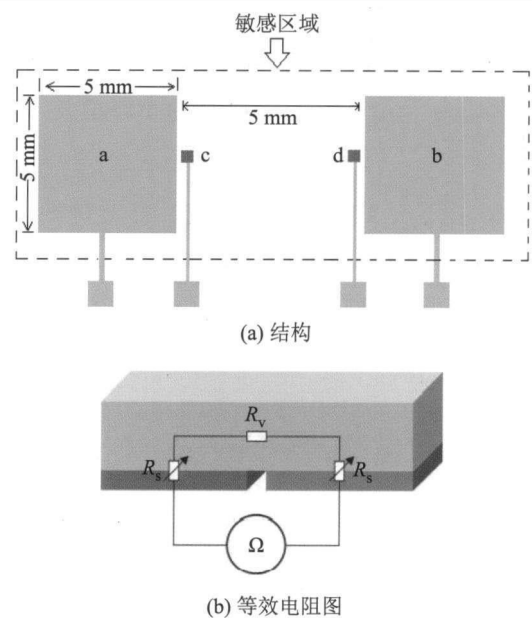


图1 对比实验用传感器

Fig.1 Sensor for comparative experiment

制作一个半球形传感头覆盖在整个敏感区域上,在传感头的顶部逐量施加压力,传感头将所受的压力均匀作用到整个力敏导电橡胶表面上,每隔1N记录下 R_1 、 R_2 的阻值,实验结果如图2所示.

由图2可知,在0~7N的压力范围内,随着压力增大, R_1 阻值显著减小,但当压力超过7N后, R_1 阻值减小明显变缓,变化幅度与 R_2 相似.分析可知,压力达到7N后,力敏导电橡胶表面与电极间的接触程度达到饱和,继续增大压力,两者间的表面接触电阻亦不再减小,此时 R_1 阻值的缓慢减小是由体压阻效应引起.而在0~7N的压力范围内, $\Delta R_1 \gg \Delta R_2$,由此可知 $\Delta R_s \gg \Delta R_v$,实验结果与结论相符.

碳纤维-PDMS具有显著的温度敏感效应,可作为温度敏感材料.温度对导电橡胶的电阻影响主

要有两方面：(1) 橡胶体受热膨胀使导电粒子间隙增宽，从而导致电导率减小，电阻率增大；(2) 由于升温产生热扰动，使得间隙中的电场发生变化，电子热激活增强，粒子间的电子跃迁几率上升导致了电阻率减小。碳纤维-PDMS 的温度敏感效应主要以热膨胀为主，主要表现为 PTC (positive temperature coefficient) 特性。

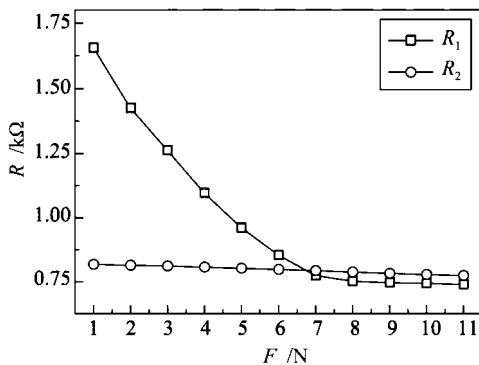


图 2 表面压阻与体压阻效应的对比

Fig.2 Comparison between surface and body piezoresistive effects

3 柔性多功能触觉传感器 (Flexible multi-functional tactile sensors)

3.1 结构设计

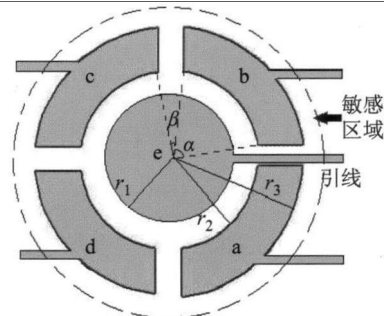
柔性多功能触觉传感器由三维力和温度传感器组成，以下对两种传感器的结构分别进行说明。

三维力传感器采用图 3(a) 所示的结构设计：电极结构由 4 个扇形电极 a、b、c、d 和 1 个圆形公共电极 e 组成。圆形公共电极 e 的半径 r_1 为 3.5 mm，圆 e 的圆心至扇形电极 a、b、c、d 内边缘的距离 r_2 为 4 mm，圆心至 a、b、c、d 外边缘的距离 r_3 为 7 mm。公共电极 e 与扇形电极 a、b、c、d 间沟道宽度为 0.5 mm，窄沟道设计减小了力敏导电橡胶的体电阻 R_v 及体压阻效应的影响。扇形电极 a、b、c、d 的弧度 α 为 70° ，a、b、c、d 间的弧度 β 为 20° ，a、b、c、d 间较大间距的设计是为减小电极 a、b、c、d 间的耦合干扰。利用导电银胶将制备的力敏导电橡胶粘贴在图 3(a) 所示的敏感区域，此时传感器就存在 4 个等效电阻 $R_1 \sim R_4$ ，如图 3(b) 所示。 $R_1 \sim R_4$ 的阻值分别为

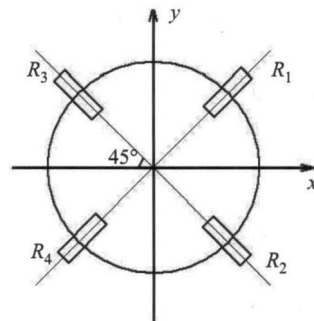
$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_s^c + R_s^a + R_v^{ca} \\
 R_2 &= R_s^c + R_s^b + R_v^{cb} \\
 R_3 &= R_s^c + R_s^c + R_v^{cc} \\
 R_4 &= R_s^e + R_s^d + R_v^{ed}
 \end{aligned} \tag{1}$$

假设力敏导电橡胶为理想材料，且与电极 a ~ d 间的接触状态均相同，即 $R_v^{ca} = R_v^{cb} = R_v^{cc} = R_v^{ed}$ ， $R_s^a =$

$$R_s^b = R_s^c = R_s^d, \text{ 则 } R_1 = R_2 = R_3 = R_4.$$



(a) 电极结构



(b) 等效电阻

图 3 三维力传感器

Fig.3 Three-dimensional force sensor

将温度传感器电极设计成如图 4(a) 所示具有 3 个叉指的形状 [5] 的结构，尺寸为 $5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 。将温度敏感导电橡胶用导电银胶粘贴在如图 4(a) 所示的敏感区域。温度传感器的电阻 R 由两部分组成：表面接触电阻 R_s 和体电阻 R_v 。电极叉指结构设计可减小 R_v ，以单个叉指的等效电路举例说明，从图 4(b) 可知 R_v 为 2 个 R_1 、 R_2 的并联电阻值：

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

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。

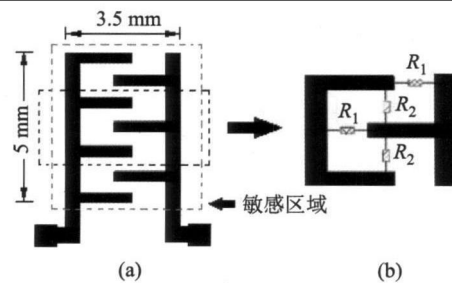


图 4 温度传感器

Fig.4 Temperature sensor

图 5(a) 为三维力和温度传感器排布组成的柔性多功能触觉传感器阵列。研究碳黑-硅橡胶和碳纤

维-PDMS 的敏感特性发现, 碳黑-硅橡胶在一定受力和温度范围内具有显著的力学敏感特性和微弱的温度敏感特性, 且力学敏感特性占主导, 温度敏感特性的影响可以忽略; 而碳纤维-PDMS 具有显著的温度敏感特性和一定的力学敏感特性, 因此存在力学/温度敏感特性的交叉干扰. 针对这一问题, 将三维力和温度传感器在阵列中的排布结构设计为凹凸状, 如图 5(b) 所示, 三维力传感器与温度传感器间的高度差使传感器阵列上加载被测物时温度传感器不受力作用, 从而消除了交叉干扰的影响.

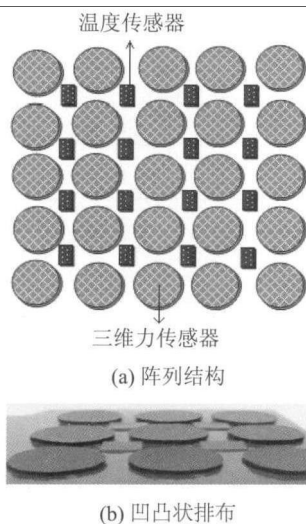


图5 柔性多功能触觉传感器阵列

Fig.5 Flexible multi-functional tactile sensor array

3.2 工作原理

为了检测三维力, 在三维力传感器上方设置一个以质地较硬的聚乙烯材料制成的半球形传感头(传感头的受力形变可忽略). 传感头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.

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. 三维力传感器受 F_x 、 F_y 、 F_z 均为正向的三维力 \mathbf{F} 的作用, 可分解成 3 个独立分量逐个分析: F_x 作用于半球形传感头顶部使传感头产生绕 y 轴的旋转力矩, 与电极 a、b 接触的力学敏感导电橡胶受到压缩, 表面接触电阻减小, 表现为 R_1 、 R_2 分别减小 ΔR_1^x 和 ΔR_2^x , 与电极 c、d 接触的导电橡胶受到拉伸, 表面接触电阻增大, 表现为 R_3 、 R_4 分别增大 ΔR_3^x 和 ΔR_4^x ; 同理 F_y 作用下, R_2 、 R_3 分别减小 ΔR_2^y 和 ΔR_3^y , R_1 、 R_4 分别增大 ΔR_1^y 和 ΔR_4^y ; F_z 作用于传感头顶部, 使与电极 a ~ d 接触的导电橡胶均受到压缩, 表面接触电阻减小, 表现为 $R_1 \sim R_4$ 分别减小 $\Delta R_1^z \sim \Delta R_4^z$. 忽略力敏导电橡

胶的体压阻效应影响, 由上述分析可得:

$$\begin{aligned} \Delta R_1^x/R_1 + \Delta R_1^y/R_1 + \Delta R_1^z/R_1 &= \Delta R_1/R_1 \\ \Delta R_2^x/R_2 + \Delta R_2^y/R_2 + \Delta R_2^z/R_2 &= \Delta R_2/R_2 \\ \Delta R_3^x/R_3 + \Delta R_3^y/R_3 + \Delta R_3^z/R_3 &= \Delta R_3/R_3 \\ \Delta R_4^x/R_4 + \Delta R_4^y/R_4 + \Delta R_4^z/R_4 &= \Delta R_4/R_4 \end{aligned} \quad (3)$$

假设力敏导电橡胶为理想材料, 则三维力 $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$ 作用下的传感器电阻变化可表示为

$$\begin{aligned} \Delta R_x/R_x &= k_x F_x \\ \Delta R_y/R_y &= k_y F_y \\ \Delta R_z/R_z &= k_z F_z \end{aligned} \quad (4)$$

其中 k_x 、 k_y 、 k_z 分别为三维力传感器对 F_x 、 F_y 、 F_z 的电阻系数. 因传感器的电极 a ~ d 呈对称结构排布, 因此由 4 个电极的对称性可得:

$$\begin{aligned} \Delta R_1^x/R_1 = \Delta R_2^x/R_2 = -\Delta R_3^x/R_3 = -\Delta R_4^x/R_4 &= \Delta R_x/R_x \\ -\Delta R_1^y/R_1 = \Delta R_2^y/R_2 = \Delta R_3^y/R_3 = -\Delta R_4^y/R_4 &= \Delta R_y/R_y \\ \Delta R_1^z/R_1 = \Delta R_2^z/R_2 = \Delta R_3^z/R_3 = \Delta R_4^z/R_4 &= \Delta R_z/R_z \end{aligned} \quad (5)$$

将式 (4)、(5) 代入式 (3) 可得 $F_i (i = x, y, z)$ 与 $R_1 \sim R_4$ 的关系式, 用矩阵表示为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} k_x F_x \\ k_y F_y \\ k_z F_z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \Delta R_x/R_x \\ \Delta R_y/R_y \\ \Delta R_z/R_z \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta R_1/R_1 \\ \Delta R_2/R_2 \\ \Delta R_3/R_3 \\ \Delta R_4/R_4 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

分析可知, 式 (6) 对任意三维力 $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$ 均适用. 因此, 将 $\Delta R_j/R_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 代入式 (6) 即可求得 F_x 、 F_y 、 F_z , 此三个分量叠加即为三维力 \mathbf{F} .

对于温度传感器, 假设温度敏感导电橡胶为理想材料, 根据碳纤维-PDMS 的温度敏感效应, 则温度传感器的温度-电阻关系式为

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (7)$$

式 (7) 中的 α 即为传感器的温度电阻系数, R_0 为传感器在 0°C 时的阻值, R_T 为传感器在温度 T 时的阻值. 对式 (7) 作变换可得:

$$\frac{R_T - R_0}{R_0} = \alpha T \quad (8)$$

因此, 将 $(R_T - R_0)/R_0$ 代入式 (8) 就可求出温度 T .

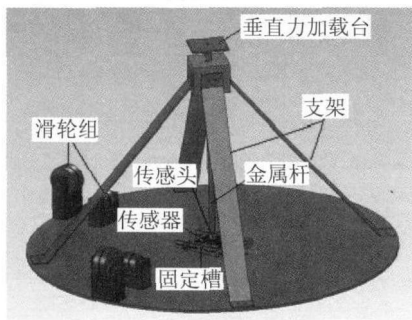
4 实验和讨论 (Experiment and discussion)

4.1 三维力标定

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 6 所示。



(a) 实物图



(b) 结构示意图

图 6 三维力加载平台

Fig.6 Three-dimensional force loading platform

图 6(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半球形传感头的顶部, 传感头将所受的压力均匀作用到整个三维力传感器的表面上, 从而实现对三维力传感器 F_z 的加载。用一根细绳一端衔接传感头顶部的, 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。三维力传感器分别加载 F_x 、 F_y 及 F_z , 记录 $R_1 \sim R_4$ 的阻值, 实验数据如图 7 所示。

由图 7(c) 可知, 传感器检测 F_z 的有效量程为 $0 \sim 8\text{N}$, 当 F_z 超过 8N 后, $R_1 \sim R_4$ 的阻值变化量明显减小。分析可知, F_z 在 $0 \sim 8\text{N}$ 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 8N 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。由图 7(a) 和 (b) 可知, F_x 或 F_y 在 $0 \sim 3.5\text{N}$ 的测量范围内, $R_1 \sim R_4$ 的阻值变化具有较好的线性, 因此选取 $0 \sim 3.5\text{N}$ 段作为检测 F_x 和 F_y 的有效量程。从图 7 可知, $R_1 \sim R_4$ 的阻值变化规律与三维力传感器受

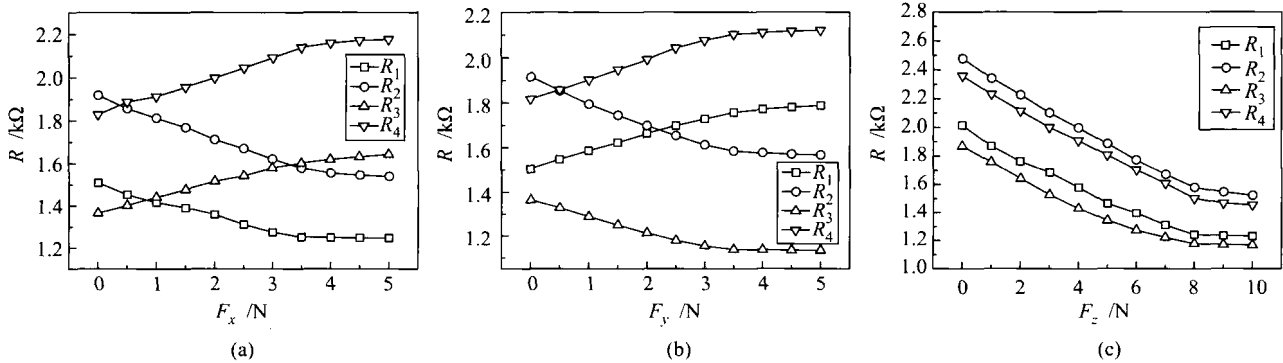


图 7 $R_1 \sim R_4$ 关于 $F_i (i=x, y, z)$ 的阻值变化

Fig.7 Resistance of $R_1 \sim R_4$ v.s. $F_i (i=x, y, z)$

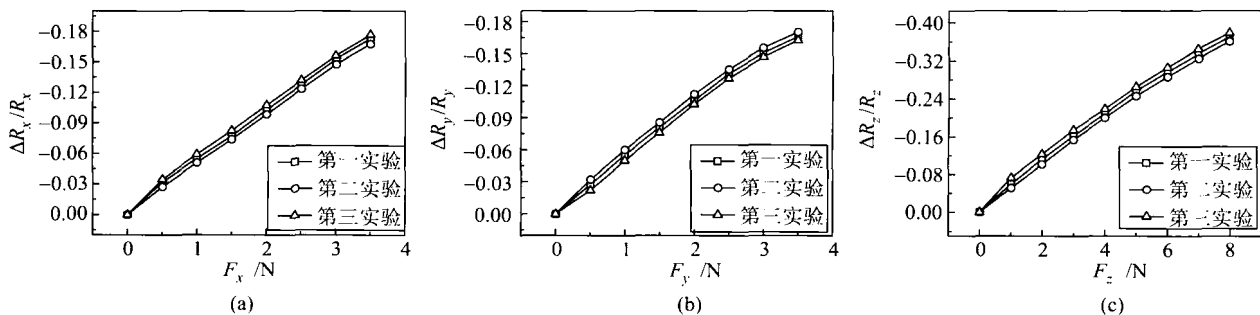


图 8 三维力标定实验

Fig.8 Three-dimensional force calibration experiment

力电阻变化的理论分析相同,说明传感器设计合理,具备检测三维力的功能。

重复上述实验,将有效量程段内(F_x 、 F_y 的量程为 $0 \sim 3.5\text{N}$, F_z 的量程为 $0 \sim 8\text{N}$)的数据 $\Delta R_j/R_j$ ($j=1,2,3,4$) 通过式 (6) 转化为 $\Delta R_i/R_i$ ($i=x,y,z$), 结果如图 8 所示。对图 8 中的数据作线性拟合,该拟合斜率即为式 (4) 中的系数 k_i ($i=x,y,z$), 三次实验结果如表 1 所示,取均值得: $\bar{k}_x = -0.0489\text{N}^{-1}$, $\bar{k}_y = -0.0485\text{N}^{-1}$, $\bar{k}_z = -0.0460\text{N}^{-1}$ 。

表 1 F_i v.s. $\Delta R_i/R_i$ ($i=x,y,z$) 的拟合斜率
Tab.1 Linear fitting slope of F_i v.s. $\Delta R_i/R_i$ ($i=x,y,z$)

	k_x / N^{-1}	k_y / N^{-1}	k_z / N^{-1}
1	-0.0490	-0.0484	-0.0461
2	-0.0480	-0.0491	-0.0455
3	-0.0497	-0.0481	-0.0465

对三维力传感器分别加载 6 组不同的三维力,将 $R_1 \sim R_4$ 的相对电阻变化值代入式 (6) 得到 $\Delta R_i/R_i$ ($i=x,y,z$) 并求解出三维力大小,结果如表 2 所示。

表 2 三维力实验结果及误差
Tab.2 Experimental results and errors of three-dimensional force

$(F_x / \text{N}, F_y / \text{N}, F_z / \text{N})$		$\Delta R_i/R_i$ ($i=x,y,z$)			相对误差/(%)		
实际值	实验值	$\Delta R_x/R_x$	$\Delta R_y/R_y$	$\Delta R_z/R_z$	F_x	F_y	F_z
(0.00,0.00,6.00)	(-0.02,0.09,6.49)	0.0010	-0.0046	-0.2986	0.57	2.57	6.13
(1.00,0.00,0.00)	(1.12,-0.08,0.08)	-0.0550	0.0041	-0.0035	3.43	2.29	1.00
(0.00,2.00,0.00)	(-0.03,2.20,0.13)	0.0017	-0.1065	-0.0061	0.86	5.71	1.63
(1.00,1.00,3.00)	(1.03,1.16,3.71)	-0.0503	-0.0561	-0.1705	0.86	4.57	8.88
(2.00,3.00,5.00)	(2.07,3.13,5.72)	-0.1012	-0.1517	-0.2632	2.00	3.71	9.00
(3.00,3.50,8.00)	(3.17,3.29,8.15)	-0.1551	-0.1595	-0.3751	4.86	6.00	1.88

由表 2 可知,三维力传感器的实验值与实际值间存在一定的误差,计算可知相对误差均小于 10% (在误差允许的范围内),最大误差为 9.00%。经分析,误差产生的原因有以下几点: (1) 构建的求解三维力的理论模型中忽略了体压阻效应的影响,近似认为传感器的电阻变化全由表面压阻效应引起; (2) 忽略了电极 a ~ d 间存在的交叉耦合干扰; (3) 力敏

导电橡胶为复合高分子材料,具有粘性和弹性双重机械性能(粘弹性),因此材料的蠕变特性导致了实际测量的误差。

为研究三维力传感器的维间干扰,对传感器分别加载各单维力(F_x 、 F_y 或 F_z),由式 (6) 求解出对其余 2 个分量力的干扰大小及造成的误差,结果如表 3 所示。

表 3 三维力传感器的维间干扰

Tab.3 Dimensional interference of three-dimensional force sensor

加载力/N	维间干扰/N				误差/(%)	加载力/N	维间干扰/N				误差/(%)	加载力/N	维间干扰/N				误差/(%)
F_x	F_y	F_z	F_y	F_z		F_y	F_x	F_z	F_x	F_z		F_z	F_x	F_y	F_x	F_y	
0.50	-0.01	0.05	0.29	0.63		0.50	-0.01	0.04	0.29	0.50		1.00	0.07	-0.06	2.00	1.71	
1.50	-0.07	0.02	2.00	0.25		1.50	-0.01	0.13	0.29	1.63		3.00	-0.09	0.10	2.57	2.86	
2.50	-0.06	0.07	1.71	0.88		2.50	-0.02	0.11	0.57	1.38		5.00	-0.02	0.07	0.57	2.00	
3.50	0.01	0.03	0.29	0.38		3.50	-0.02	0.08	0.57	1.00		7.00	0.05	0.02	1.43	0.57	

由表 3 可知,三维力的各分量间存在一定的维间干扰,计算可知维间干扰造成的最大误差为 2.86%。三维力传感器的维间干扰主要由 4 个电极 a ~ d 间的交叉耦合引起,通过后端信号处理可消除该误差。

4.2 温度实验

采用苏南实验仪器厂 GDW_100 型高低温实验箱将温度传感器从 15°C 升温至 110°C , 每间隔 5°C 记录传感器的阻值,三次重复实验的数据作归一化

处理结果,如图 9 所示。

由图 9 可知, $15^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 内传感器的阻值随温度升高较平稳地增大, 85°C 后继续升高温度,阻值急剧增大,因此从应用于机器人敏感皮肤的温度传感器的实际测温范围和传感器的精度等综合考虑选择 $15^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 温度段作为温度传感器的有效量程。对图 9 中 $15^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 段实验数据作线性拟合,该拟合斜率即为式 (7) 中的温度电阻系数 α 。3 次实验结果分别为 $\alpha_1 = 0.0665^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_2 = 0.0701^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_3 =$

$0.0673^{\circ}\text{C}^{-1}$, 均值 $\bar{\alpha} = 0.0680^{\circ}\text{C}^{-1}$.

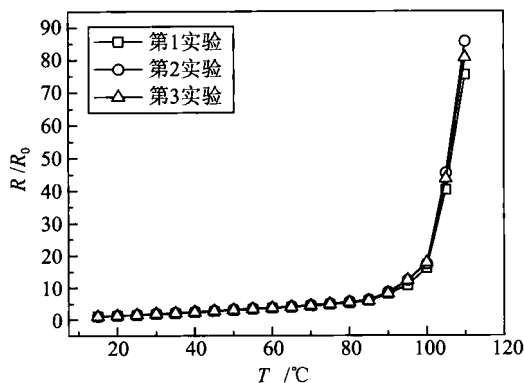


图9 温度标定实验

Fig.9 Temperature calibration experiment

以 15°C 时温度传感器的阻值作为参考点, 分别测量温度传感器在 20°C 、 30°C 、 40°C 、 50°C 、 60°C 、 70°C 、 80°C 下的阻值, 并将传感器的相对电阻变化值代入式 (8) 中求解出温度 T 的大小, 结果如表 4 所示。

表4 温度实验结果及误差

Tab.4 Results and errors of temperature experiment

$T/^{\circ}\text{C}$		实验值	相对误差/(%)
实际值	实验值	$(R-R_0)/R_0$	T
20	19.13	0.2811	1.24
30	27.44	0.8459	3.66
40	35.35	1.3835	6.64
50	45.52	2.0752	6.40
60	54.48	2.6843	7.89
70	64.05	3.3354	8.50
80	78.88	4.3440	1.60

由表 4 可知, 温度传感器的实验值与实际值间存在一定误差, 其中最大相对误差为 8.50%, 小于 10% (在误差允许范围内)。分析可知, 实验结果与实际温度间存在的一定差异主要由温度传感器的非线性和非重复性误差引起。由于温度的升高, PDMS 体积会发生膨胀, 从而减小了碳纤维间的接触, 导致电阻增大, 但热膨胀的过程与温度是近似线性相关, 存在一定的非线性误差。且碳纤维分布及相互间接触并非严格均匀, 也导致了温度传感器存在一定的非线性误差。同时, 碳纤维分布的不规律也导致了温度传感器的重复性不够理想。此外, 碳纤维-PDMS 这种复合材料具有导电通路和隧道效应两种导电机理, 在升温过程中, 这两种导电机理均存在不稳定性, 也导致了非线性及非重复性误差。

由实验结果可知, 温度传感器的电阻变化规律

与理论分析相符。若可采用新技术改善温度敏感材料特性, 可进一步提高温度传感器的各方面性能。

5 结论 (Conclusion)

本文基于碳黑-硅橡胶显著的压阻效应 (主要为表面压阻效应) 设计了四电极对称结构的三维力传感器, 基于碳纤维-PDMS 显著的温度敏感效应设计了叉指结构的温度传感器, 从理论上分析了检测三维力和温度的工作原理。针对三维力和温度间的交叉干扰问题, 柔性多功能触觉传感器阵列采用三维力和温度传感器凹凸状交替排布结构。实验验证了表面压阻效应和体压阻效应共同作用时压阻效应占主导, 体压阻效应可近似忽略。三维力和温度实验表明, 这种新型的柔性多功能触觉传感器具备检测三维力和温度的功能, 可应用于机器人敏感皮肤等相关领域。

参考文献 (References)

- [1] Someya T, Kato Y, Sekitani T, et al. Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(35): 12321-12325.
 - [2] Engel J, Chen N, Tucker C, et al. Flexible multimodal tactile sensing system for object identification[C]//5th IEEE Conference on Sensors. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 563-566.
 - [3] Wang L H, Ding T H, Wang P. Research on stress and electrical resistance of skin-sensing silicone rubber/carbon black nanocomposite during decompressive stress relaxation[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(6): 1-7.
 - [4] Weiss K, Worn H. The working principle of resistive tactile sensor cells[C]//IEEE International Conference on Mechatronics & Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 471-476.
 - [5] Pecora A, Zampetti E, Pantalei S, et al. Interdigitated sensorial system on flexible substrate[C]//IEEE Conference on Sensors. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 21-24.
 - [6] Ochoteco E, Pomposo J A, Sikora T, et al. All-plastic distributed pressure sensors: Taylor-made performance by electroactive materials design[J]. Microsystems Technologies, 2008, 14(8): 1089-1097.
 - [7] Noda K, Hoshino K, Matsumoto K, et al. A shear stress sensor for tactile sensing with the piezoresistive cantilever standing in elastic material[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 127(2): 295-301.
 - [8] Knite M, Tupureina V, Fuiht A, et al. Polyisoprene - multi-wall carbon nanotube composites for sensing strain[J]. Materials Science and Engineering: C, 2007, 27(5-8): 1125-1128.
 - [9] 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.

(下转第 359 页)

6 结论 (Conclusion)

研究了基于姿态反馈的球面并联机构闭环控制方法, 通过传感器反馈的偏差值和姿态测量值对姿态进行补偿, 有效地提高了仿生眼的定位精度. 制作了类似人眼运动特点、比人眼尺寸略大、具有控制信号和视频信号接口的球面并联仿生眼实物, 基于 DSP 的控制系统实现了逆解和控制算法的实时在线计算. 实验结果表明, 姿态精度得到有效提高, 满足正常视频监控和目标跟踪要求, 系统工作稳定. 最后, 本文提出的姿态闭环控制方法对其他并联机构位置闭环控制也有一定的借鉴作用.

参考文献 (References)

- [1] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
Huang Z, Kong L F, Fang Y F. Mechanism theory and control of parallel robot[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [2] 阎洪禄, 于秀敏. 眼生理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001.
Yan H L, Yu X M. Physiology of the eye[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2001.
- [3] 李凤鸣. 眼科全书[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1996.
Li F M. Encyclopaedia of the eye[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1996.
- [4] Cannata G, Maggiali M. Implementation of Listing's law for a tendon driven robot eye[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 3940-3945.
- [5] 黄田, 曾宪善, 倪雁冰, 等. 球面并联操作机的尺度综合方法[J]. 自然科学进展, 2000, 10(8): 751-756.
Huang T, Zeng X J, Mi Y B, et al. Dimensional synthesis of spherical parallel manipulators[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(8): 751-756.
- [6] Gosselin C M, Hamel J F. The agile eye: A high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1994: 781-786.
- [7] Gosselin C M, St-Pierre E, Gagne M. On the development of the agile eye[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1996, 3(4): 29-37.
- [8] 金振林, 曹舜, 高峰. 新型机器人肩关节及其运动学分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(14): 1639-1642.
Jin Z L, Cao S, Gao F. Design and kinematics analysis of a novel robot shoulder joint[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(14): 1639-1642.
- [9] 刘和平, 邓力, 江渝. 数字信号处理器原理、结构及应用基础: TMS320F28x[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
Liu H P, Deng L, Jiang Y. Theory, architecture and application fundament of digital signal processor: TMS320F28x[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.

作者简介:

李超 (1986-), 男, 硕士生. 研究领域: 机器人视觉与仿生眼技术.
谢少荣 (1972-), 女, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人视觉与仿生眼技术.

(上接第 353 页)

- [10] Wisitsoraat A, Patthanasetakul V, Lomas T, et al. Low cost thin film based piezoresistive MEMS tactile sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 139(1/2): 17-22.
- [11] Huang Y, Ming X H, Xiang B, et al. Two types of flexible tactile sensor arrays of robot for three-dimension force based on piezoresistive effects[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1032-1037.
- [12] Manunza I, Bonfiglio A. Pressure sensing using a completely flexible organic transistor[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2007, 22(12): 2775-2779.
- [13] Shih W P, Tsao L C, Lee C W, et al. Flexible temperature sensor array based on a graphite-polydimethylsiloxane composite[J]. Sensors, 2010, 10(4): 3597-3610.
- [14] Chang W Y, Fang T H, Lin H J, et al. A large area flexible array sensors using screen printing technology[J]. IEEE Journal of Display Technology, 2009, 5(6): 178-183.
- [15] Chia B T, Chang D R, Liao H H, et al. Temperature sensor array using flexible substrate[C]//20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 589-592.

作者简介:

黄英 (1960-), 女, 博士, 教授. 研究领域: 敏感材料与传感技术, 机器人用触觉传感器.
陆伟 (1986-), 男, 硕士生. 研究领域: 敏感材料与传感技术, 机器人用触觉传感器.