

## Study of a New Type Skin Liked Arrayed Tactile Sensor Based on Conductive Rubber\*

DING Junxiang<sup>1,2</sup>, GE Yunjian<sup>1,2\*</sup>, XU Fei<sup>1,2</sup>, HAO Chuanguang<sup>1,2</sup>, HUANG Ying<sup>1,3</sup>

(1. Center for Biomimetic Sensing and Control Research Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2. Department of Automation, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China;  
3. Department of Applied Physics in Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The paper proposed a new type skin liked arrayed tactile sensor based on conductive rubber, which has the framework of two layers of staggered nodes, the widely used liquid rubber injection molding (LIMS) method is used for "the overall injection molding" of the conductive rubber, the location and the magnitude of the force can be solved by measuring the resistance variation of the conductive rubber under the force. The design breaks through most of current flexible tactile sensor array based on the armor-type structure with favorable mechanical ability, good flexibility, and strong anti-jamming and realizes three-dimensional force detection on the continuous surface of the sensor. The simulation result shows that the flexible arrayed tactile sensor can be used for the 3-D force detection with high resolution and accuracy under the condition of ideal conductive character, which meet the current need of the use of robot skin.

**Key words:** skin liked tactile sensor; 3-D; array; decouple; ANSYS

**EEACC:** 7230J

## 基于导电橡胶的一种新型类皮肤触觉传感器阵列\*

丁俊香<sup>1,2</sup>, 葛运建<sup>1,2\*</sup>, 徐菲<sup>1,2</sup>, 郝传光<sup>1,2</sup>, 黄英<sup>1,3</sup>

(1. 中科院智能所仿生感知与控制研究中心, 合肥 230031;  
2. 中国科技大学自动化系, 合肥 230027; 3. 合肥工业大学理学院, 合肥 230009)

**摘要:** 本文设计了一种基于导电橡胶的类皮肤柔性触觉传感器阵列, 传感器阵列采用交叉排列的两层节点的框架结构, 用注射成型(LIMS)的方法进行导电橡胶的整体浇注, 通过测量外力作用下导电橡胶的阻值变化, 求解出加载在柔性传感器表面上的三维力位置和大小。该设计突破了当前基于盔甲的柔性触觉传感器的设计思路, 具有优良力学特性、柔韧性好、抗干扰能力强、在传感器表面可以连续点测量的特性。实验仿真结果表明, 在理想导电橡胶的条件下, 设计的柔性触觉传感器阵列测量三维力有较高的分辨率和精度, 可以满足当前用于作机器人皮肤的需要。

**关键词:** 类皮肤触觉传感器; 三维; 阵列; 解耦; 有限元分析

**中图分类号:** R318; TP212.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2010)03-0315-07

类皮肤触觉阵列感知是机器人实现与外部环境直接作用的必需媒介, 是仿生机器人的一种重要的研究内容。现有的 MEMS 阵列传感器则以刚性的硅为衬底<sup>[1-2]</sup>, 其缺点是: 单个分立传感器封装后体积较大, 降低了空间分辨率, 难以获得较为准确的连续分布信息; 另外, 多个分立器件的总的封装成本和

安装成本都远高于单个传感器阵列的封装的安装成本。此外, 当前的基于盔甲的柔性触觉传感器采用多个基于弹性基底与弹性保护层之间的三维力传感器形成三维力敏感阵列<sup>[3-4]</sup>。其缺点是无法实现真正意义上的柔性, 并且其多个独立三维力传感器的设计使其无法实现整个传感器表面的连续测量。所

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(60672024); 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2007AA04Z220)

收稿日期: 2009-10-15 修改日期: 2009-11-10

以寻找既满足柔软性的要求,使机器人能够灵活的运动,又能敏感地感知环境的材料已成为类皮肤传感器的研究的重点。导电橡胶的良好压敏特性以及柔软性特点,非常适合作为此类触觉传感器的敏感元件,目前大量的研究都集中在基于导电橡胶的触觉传感器的研究。

但是由于制备的困难以及导电橡胶的非线性,目前对基于压敏导电橡胶的触觉传感器的研究,主要集中在多个独立、单维的触觉传感器阵列的研究<sup>[5-6]</sup>。为了解决导电橡胶的三维力的测力困难,提出新的传感器阵列结构,不仅突破了当前的基于导电橡胶的单维触觉测量的局限,而且突破了基于盔甲的柔性触觉传感器的设计思路,可以在连续的传感器表面实现三维力的检测<sup>[7-10]</sup>。本文详细介绍了传感器结构,采集电路以及传感器的检测原理。该项研究不仅能满足目前仿人机器人智能操作的迫切需要,并能应用于体育训练、康复医疗、人体建模与仿真、以及运动生物力学等诸多领域中,具有广泛的应用前景。

### 1 触觉传感器的制备

传感器采用交叉的两层节点层构成框架,用目前广为使用的注射成型(LIMS)方法将导电橡胶浇注到传感器节点框架中,如图 1 所示。敏感元件的导电橡胶样品由 GD-401 型硅橡胶;CB3100 型炭黑,Hn-2002g 型纳米 SiO<sub>2</sub> (表观密度分别为 0.128 g/cm<sup>3</sup>,0.15~0.18 g/cm<sup>3</sup>),及其他辅助材料组成。样品的压阻特性通过测试平台实验检测,具有良好的压阻特性,样品的压阻特性曲线如图 2 所示<sup>[11]</sup>。

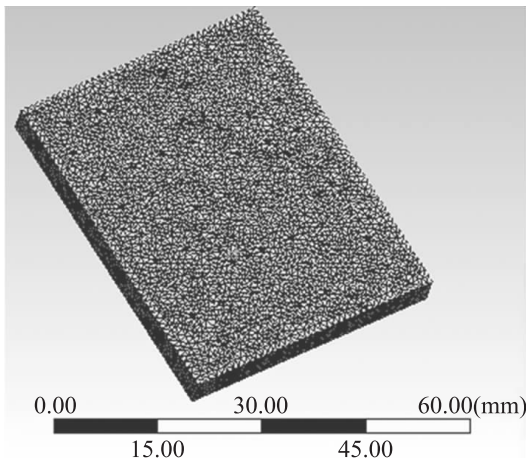


图 1 样品

传感器节点结构示意图如图 3 所示,上下层节点互相错位安排。在不影响结果的情况下,假定节点的大小可以忽略不计。用大写字母表示上层节点,

如  $A_0A_1A_2\cdots B_0B_1B_2\cdots C_0C_1C_2\cdots$ ,小写字母表示下层节点,如  $a_0a_1a_2\cdots b_0b_1b_2\cdots c_0c_1c_2\cdots$ ,点阵俯视图如图 4 所示。

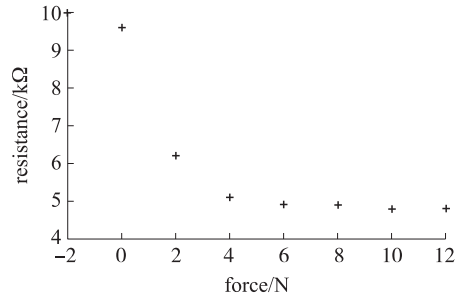


图 2 样品的压阻特性曲线

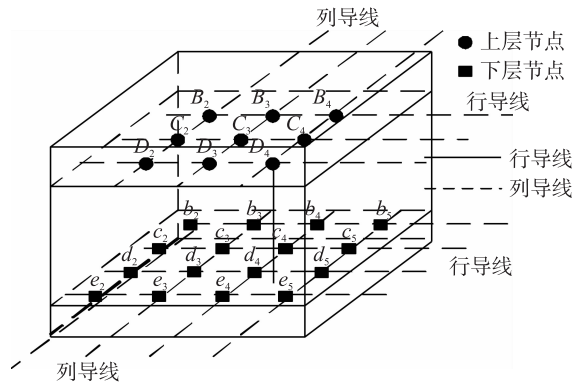


图 3 传感器的结构示意图

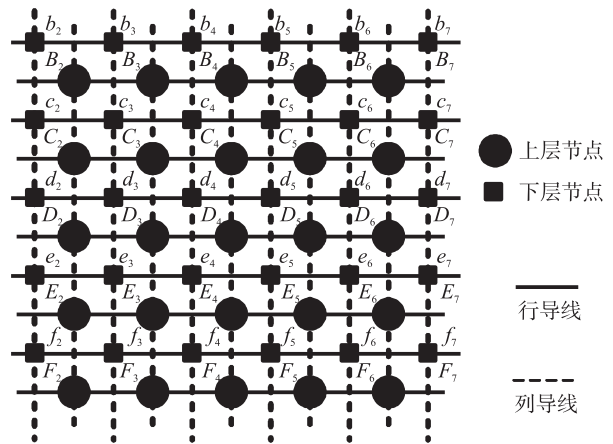


图 4 传感器的俯视图

由于导电橡胶的压敏特性,传感器在外力作用下,橡胶会发生形变,节点间阻值也会随之发生变化。传感器的节点间阻值采用行扫描和列扫描,为防止同一层的所有节点被行列导线连通,用绝缘胶将两个相同的节点粘在一起作为一个节点。这两个节点位于同一个位置,绝缘胶上侧节点行相连,绝缘胶下侧节点列相连,由绝缘胶包裹的导线与节点相通。试验样品上层节点为 9×7 的矩阵,下层为 10×8,节点间距以及上下节点层间距均为 5 mm。传感器尺寸为 50 mm×40 mm×5 mm,触觉力量程为 Z 方向 20 N;X、Y

方向 10 N;硬度(邵氏):30~50;拉伸强度(kg/cm<sup>2</sup>) ≥10;精度误差 Z 方向 1~2 % FS;X、Y 方向:3~5 % FS;弹性模量  $E$  为 1.379 9 MPa;泊松比  $\mu = 0.49$ ;硬度  $A = 40$ ;密度  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ 。

该传感器的测量原理是通过对外力作用下阻值变化的检测,求解加载在传感器上的外力的大小。为准确反映导电橡胶阻值在外力作用下发生的变化,力作用点和测量节点应尽可能在同一位置,但实际测量时节点外露可能导致节点与导电橡胶接触不好,同时容易磨损,故将导电橡胶浇注入节点框架中时,节点层外侧各保留一定厚度的导电橡胶薄层。由于外层橡胶薄膜非常薄,分析传感器受力情况的时候,可假定薄膜是不影响的,外力是直接加载在节点上,外力作用时上层节点发生位移,而下层节点因贴近固定面不发生位移。

## 2 传感器信号采集电路

传感器电路部分主要负责信号检测、滤波、放大、转换、并发送给计算机,示意如图 5 所示。电路分两部分,一部分是传感器的信号采集部分,主要向检测电路指定行列输入电压,采集指定行列电流,经过放大器输出到端口。主要由计数器、译码器、多选一模拟开关、运算放大器以及主控制器、存储器、接口等构成。另一部分为主控制器和上位机接口电路部分,主要完成数据的存储功能和 USB 接口模块,与传感器模块的接口,包括电源与复位模块,控制器模块以及 JTAG 接口,信号的滤波和 AD 转换模块。

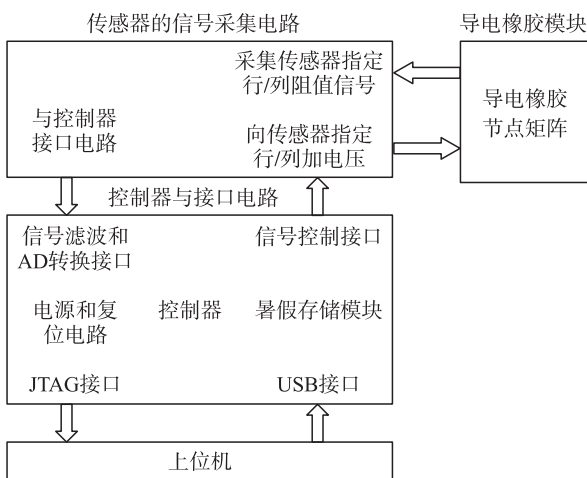


图 5 传感器的采集电路

通过传感器的采集电路,可以获得传感器受力分析的行列、行列、列列、列行阻值矩阵,分别定义为  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 。下文将对这些阻值矩阵进行解耦,求解加载在传感器上的外力的大小。

## 3 触觉传感器信号处理

当有外力加载到传感器上,检测电路测量的阻值矩阵会发生变化,该传感器的测量原理就是通过阻值矩阵的分析,求解加在传感器上的外力的大小。实验数据表明,导电橡胶是一种有滞环、非线性等特性的导电材料,基于实际导电橡胶特性的传感器受力分析会面临很多的困难,甚至无法求解。故首先理想化材料特性以简化算法,假设导电橡胶特性是理想的线性且各向同性的,对传感器先进行基于理想情况下的受力分析。在实际测量应用时,可以采用人工智能的算法对本文的理论结果进行补偿,以获得尽可能接近实际的传感器的受力。本文仅对理想材料下的传感器进行受力分析,后续的工作将进一步解决误差补偿。

### 3.1 导电橡胶特性理想近似

导电橡胶属于粘弹性材料,在小形变下材料符合胡克定律:  $F = k \times \Delta s$ 。其中  $F$  为导电橡胶所受到的外力,  $\Delta s$  为导电橡胶的形变。由导电橡胶理想特性的各向同性和线性特性,导电橡胶内任意两节点间电阻正比于两点间距离。又节点行或列之间的阻值等效于多个电阻并联在两条线之间,其等效电阻接近最小并联阻值。设扫描线  $\vec{b_1 b_2}$  与扫描线  $\vec{A_1 A_2}$  之间等效电阻:

$$R_{equ} = g \times \min(|A_0 b_0|, |A_0 b_1|, \dots, |A_1 b_0|, |A_1 b_1|, \dots, |A_n b_0|, |A_n b_1|) \quad (1)$$

式中,  $R_{equ}$  为扫描线与扫描线之间的等效阻值,  $g$  为材料的阻值与距离的比例系数。  $|A_0 b_0|, |A_0 b_1|, |A_0 b_2|$  等为节点间的距离。

由上述分析可知,对阻值的分析等效于对节点距离的分析,通过节点受力后节点间距离的变化求解传感器所受外力大小。为方便求解,定义节点间距离如图 6 所示。

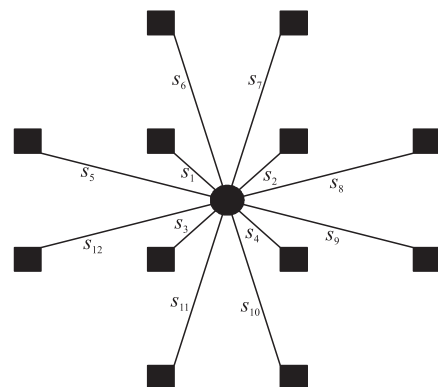


图 6 节点间距离定义

设传感器受力点在  $D_4$  节点,在外力作用下  $D_4$  移动到  $D'_4$ 。传感器求解分两大步,首先分析受力点位置,即确定是  $D_4$  节点受力,提出一种图解的方式,可以准确确定受力节点的位置。然后在该点建立坐标系,如图7所示。对阻值矩阵作进一步分析,求解该节点处传感器所受的外力的大小。

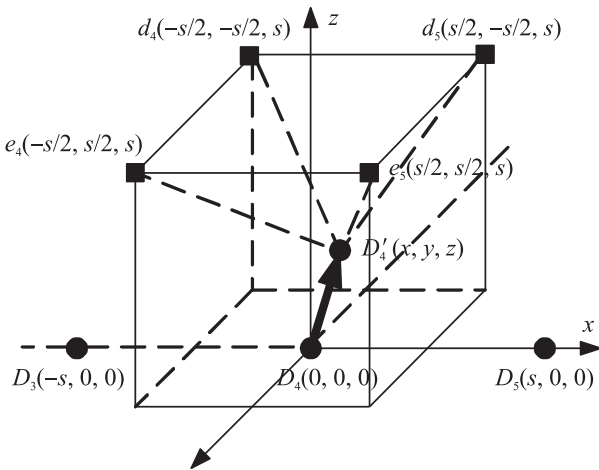


图7  $D_4$  点坐标系

3.2 图解受力点位置

将上层  $7 \times 9$  节点矩阵的  $s_1, s_2, s_3, s_4$  用线段连起来,另用一个  $14 \times 18$  的矩阵  $E$  与其对应, $E$  的所有元素分别对应  $7 \times 9$  个节点的所有  $s_1, s_2, s_3, s_4$ ,表示这些连线在外力作用下距离变小的可能性。如图8所示,图中连线为  $D$  行的所有  $s_1, s_2$  连线,这些线段分别对应了  $E$  的第7行的18个元素。将  $E$  赋初值为0,表示初始没有受到外力作用。由于实际传感器所受外力的  $f_z$  都是正方向的,故某点受力时,其  $s_1, s_2, s_3, s_4$  四个连线的距离中的至少有一个变小,则阻值矩阵中的相应阻值变小。如传感器表面节点  $(i, j)$  处有外力加载,外力作用使该节点处的  $s_1$  变小,则相应阻值矩阵的  $R_1(i, i)$  变小,此外,  $R_2(i, j)$  变小,  $R_3(j, j)$  变小,  $R_4(j, i)$  也变小。解耦过程则反过来,根据阻值矩阵来反推受力点位置。具体来说,如果测量的阻值矩阵的  $R_1(i, i)$  小于传感器在没有受力作用时的值,则可推断第  $i$  行的必有节点的  $s_1, s_2$  变小,则将矩阵  $E$  的相应行元素加1。类似,分析其他几个阻值矩阵的阻值则可确定受力点的位置。

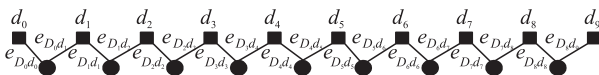


图8 矩阵  $E$  的第7行元素对应的线段

$$E = \begin{matrix} e_{A_0}, e_{A_1}, e_{A_2}, \dots, e_{A_8} \\ e_{B_0}, e_{B_1}, e_{B_2}, \dots, e_{B_8} \\ \vdots \\ e_{G_0}, e_{G_1}, e_{G_2}, \dots, e_{G_8} \end{matrix} = \begin{matrix} \left| \begin{matrix} e_{s_1}, e_{s_2} \\ e_{s_3}, e_{s_4} \end{matrix} \right|_{A_0}, \left| \begin{matrix} e_{s_1}, e_{s_2} \\ e_{s_3}, e_{s_4} \end{matrix} \right|_{A_1}, \dots, \left| \begin{matrix} e_{s_1}, e_{s_2} \\ e_{s_3}, e_{s_4} \end{matrix} \right|_{A_8} \\ \vdots \\ \left| \begin{matrix} e_{s_1}, e_{s_2} \\ e_{s_3}, e_{s_4} \end{matrix} \right|_{G_0}, \left| \begin{matrix} e_{s_1}, e_{s_2} \\ e_{s_3}, e_{s_4} \end{matrix} \right|_{G_1}, \dots, \left| \begin{matrix} e_{s_1}, e_{s_2} \\ e_{s_3}, e_{s_4} \end{matrix} \right|_{G_8} \end{matrix} = \begin{matrix} e_{1,1}, e_{1,2}, e_{1,3}, e_{1,4}, \dots, e_{1,15}, e_{1,16} \\ e_{2,1}, e_{2,2}, e_{2,3}, e_{2,4}, \dots, e_{2,15}, e_{2,16} \\ \vdots \\ e_{14,1}, e_{14,2}, e_{14,3}, e_{14,4}, \dots, e_{14,15}, e_{14,16} \end{matrix} \quad (2)$$

以上层节点  $D_4$  为例,在外力作用下移动到  $D'_4$ , 设  $|D'_4 d_4| = s'_1, |D'_4 d_5| = s'_2, |D'_4 c_4| = s'_3, |D'_4 c_5| = s'_4$ , 且  $s'_1 < s_0, s'_2 > s_0, s'_3 > s_0, s'_4 > s_0$ 。根据传感器的量程,外力引起的形变小于  $s$ , 且  $F_z$  只有正方向受力, 设  $ss(i, j) = \min(s_1, s_2, s_3, s_4)(i, j)$ , 则如果  $ss(i, j) = s_0$ , 则节点  $(i, j)$  不受外力作用; 而推导时求解出  $ss(F) < s_0$ , 则可以获知受力点位置。受力点位置解耦算法步骤如下:

- Step 1  $E = 0$ , 传感器不受外力, 如图9(a)所示;
- Step 2 如  $R_1(i, j) < R_{10}(i, j) (j \leq i)$ , 则第  $i$  行的节点的  $s_1, s_2$  都有可能小于  $s_0$ , 则  $E$  的  $(2i - 1)$  行加一, 反之, 如果  $R_1(i, j) < R_{10}(i, j) (j > i + 1)$ , 则  $E$  的  $(2i)$  行加一。
- Step 3 如  $R_2(i, j) < R_{20}(i, j)$ , 则节点  $(i, j)$  的  $s_1, s_3$  和节点  $(i, j - 1)$  的  $s_2, s_4$  有可能变小, 则  $E(2i - 1, 2j - 1), E(2i, 2j - 1), E(2i - 2, 2j - 2), E(2i - 2, 2j - 2)$  都加一。
- Step 4 如  $R_3(i, j) < R_{30}(i, j) (j \leq i)$ , 则第  $i$  列的所有节点的  $s_1, s_3$  都有可能小于  $s_0$ , 则  $E$  的  $(2i - 1)$  列的加一, 反之,  $R_3(i, j) < R_{30}(i, j) (j > i + 1)$ , 则  $E$  的  $2i$  列加一。
- Step 5 如  $R_4(i, j) < R_{40}(i, j)$ , 则节点  $(i, j)$  的  $s_1, s_2$  和节点  $(i - 1, j)$  的  $s_3, s_4$  有可能小于  $s_0$ , 则  $E(2i - 1, 2j - 1), E(2i - 1, 2j), E(2i - 2, 2j - 1), E(2i - 2, 2j)$  加一。
- Step 6 矩阵  $E$  的最大的元素对应了所有线段中形变最大的节点所在的位置。

根据上述的算法,可以由阻值矩阵用图解的方法求解受力点位置在  $D_4$  如图9(b-e)。

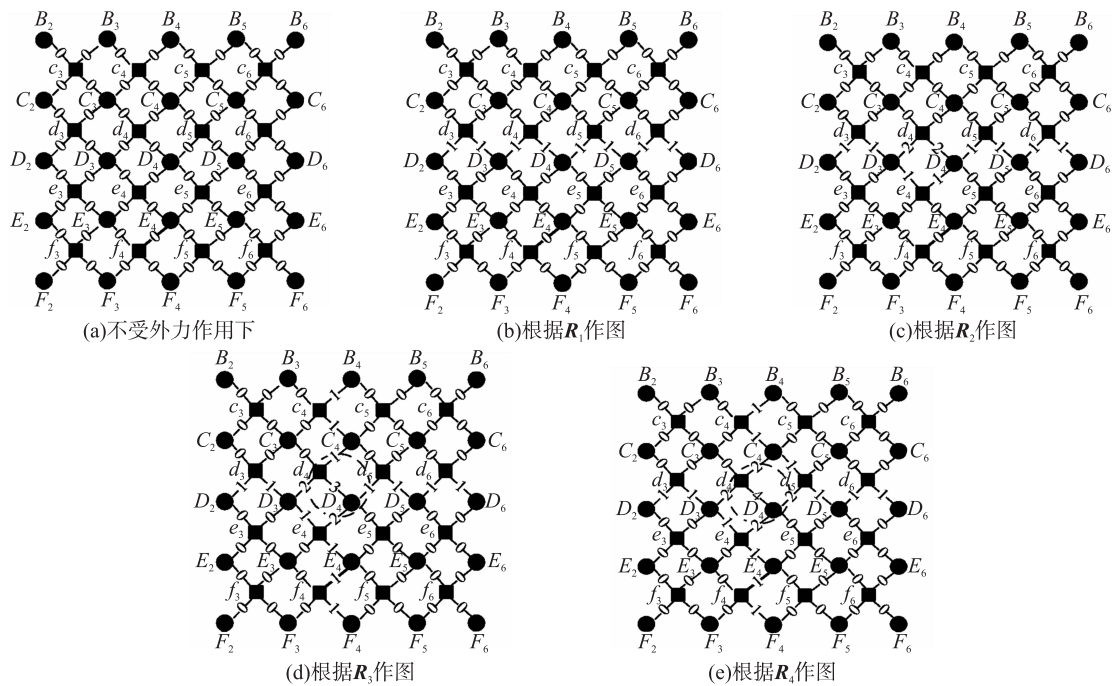


图 9 传感器不受外力作用及受力点位置在  $D_4$  的图解

$$E_{14 \times 18} = \begin{pmatrix} 0 \cdots 0, 1, 0, 1, 0, 0 \cdots 0 \\ \dots \\ 0 \cdots 0, 1, 0, 2, 1, 0 \cdots 0 \\ 1 \cdots 1, 1, 2, 4, 2, 1 \cdots 1 \\ 0 \cdots 0, 0, 1, 2, 0, 0 \cdots 0 \\ \dots \\ 0 \cdots 0, 0, 0, 1, 0, 0, \dots 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

从上述的分析可以看出  $D_4$  为传感器的受力点,且线段  $|D_4 d_4|$  为节点所有形变最大的线段。

### 3.3 受力大小求解

求解出受力点位置后,以受力点为原点建立坐标系,设节点  $D_4(0,0,0)$  在外力  $F$  作用下移动到  $D'_4(x,y,z)$ 。从上述分析可知, $D_4$  点受到外力作用,行行阻值矩阵中,  $R_1(4,4) = g \cdot s'_1$ , 则  $R_1(4,3) = g \cdot s'_6$ ,  $R_3(4,3) = g \cdot s'_5$ 。由此建立方程组可以求出以  $D_4$  为坐标原点时  $D'_4$  点的坐标。

$$\begin{cases} s'_1 = \sqrt{(x+s/2)^2 + (y+s/2)^2 + (z+s)^2} \\ s'_6 = \sqrt{(x+3s/2)^2 + (y+s/2)^2 + (z+s)^2} \\ s'_5 = \sqrt{(x+s/2)^2 + (y+3s/2)^2 + (z+s)^2} \end{cases} \quad (4)$$

根据胡克定律,传感器  $D_4(0,0,0)$  点在外力  $F$  作用下移动到  $D'_4(x,y,z)$ ,  $F$  的方向和  $\overrightarrow{D_4 D'_4}$  的方向一致,则:

$$F_x = k \times x; F_y = k \times y; F_z = k \times z;$$

由此可以求解出加载在传感器上的作用力位置以及外力大小。

## 4 结果仿真及分析

### 4.1 有限元分析

由于这种柔性触觉传感器采用的敏感材料是力敏超弹性材料导电橡胶,针对力敏导电橡胶材料的大变形和非线性问题,应用 ANSYS 的高级参数化设计语言,通过智能分析的方法自动完成了繁杂而费时的有限元分析过程。实验仿真首先采用 ANSYS 仿真了解传感器的受力情况,然后用程序仿真理想情况下的传感器受力。

ANSYS 仿真模型采用高弹 Mooney—Rivlin 型 HYPER58 单元<sup>[12]</sup>,其适用于 3—D 实体超弹性结构建模。混合  $\mu$ — $P$  方程(位移—压力)在使用静水压力的混合变更原则下允许所形成的单元矩阵承受不可压缩性约束,它应用于具有任意大位移和大应变的近似不可压缩的橡胶类材料。采用自由网格与映射网格相结合的方法,同时对载荷作用下的传感器阵列中心单元做了精细网格划分。按照实际情况对触觉传感器阵列下表面各节点进行全自由度约束,在传感器表面节点  $D_4$  处施加 X、Y、Z 三个方向的集中力载荷  $F(2,1,5)$ 。图 10(a)、10(b)、10(c)为触觉传感器在  $F(4,5) = (2, 1, 5)$  作用下的传感器有限元模型的结构变形图。

通过 ANSYS 自代后处理器可以得到每个节点相对于变形前位置的位移大小。提取节点数据的信息可以分别得到不同载荷作用下  $D_4$  点相对原来的位移变化,根据理想导电橡胶特性可求出分析传感器受力时阻值大小。

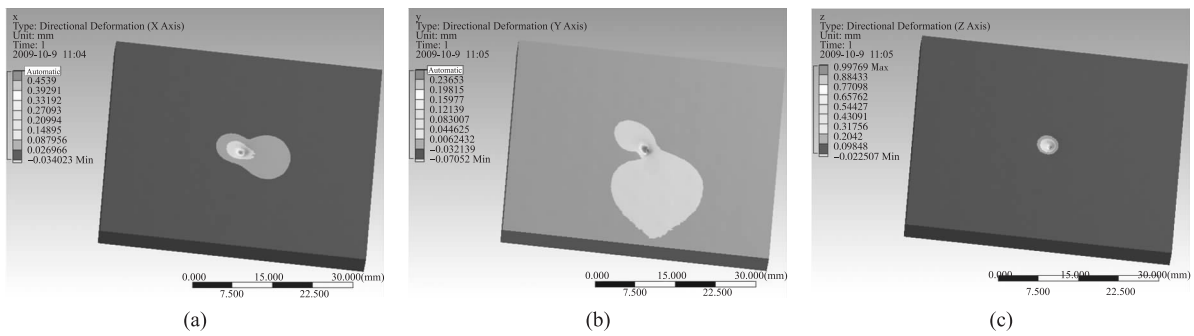


图 10  $F(4,5) = (2,1,5)$  作用下的不同视图下的位移图

4.2 程序仿真

在理想导电橡胶特性的条件下,给传感器加载如下外力,在外力大小随机的情况下,表格从上到下各行分别表示受力点受到的  $F_x, F_y, F_z$  以及受力点的  $x, y$  坐标。表 1 为实际施加在传感器上的力,以

及受力点的坐标,表 2 为对阻值矩阵进行受力分析,求解的传感器是受力大小以及受力点。

从上到下各行依次对应了从阻值矩阵解耦求出的外力的大小  $F_x, F_y, F_z$  以及外力作用点的坐标  $x$  和  $y$ 。

表 1 加载到传感器上的外力大小及受力点位置

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7
2	5.15	5.3	5.45	5.6	5.75	5.9	6.05	6.2	6.35	6.5	6.65	6.8	6.95	7.1	7.25	7.4	7.55
3	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2	3.4
4	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4
5	2	3	4	5	6	7	2	2	3	4	5	6	7	2	2	3	4

表 2 解耦求解的外力的大小

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	10.099	10.199	10.3	10.4	10.5	10.599	10.7	10.8	10.9	11	11.1	11.201	11.301	11.399	11.501	11.6	11.701
2	5.149	5.2997	5.4504	5.5995	5.7497	5.9006	6.0509	6.1996	6.3501	6.5007	6.6496	6.7996	6.9498	7.0989	7.2502	7.4004	7.5502
3	0.20	0.40	0.60	0.8006	0.99	1.2002	1.3996	1.5997	1.7997	1.9998	2.2005	2.3997	2.5993	2.8011	2.9994	3.1998	3.3992
4	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4
5	2	3	4	5	6	7	2	2	3	4	5	6	7	2	2	3	4

从仿真结果可以看出,该传感器可以适用于柔性条件下三维力的策略。

5 结论

本文提出了一种基于导电橡胶的三维柔性触觉传感器的设计思想,在导电橡胶具有理想特性的前提下,用图解的方法求解出传感器的受力点位置,并进一步解耦求解传感器的受力大小。从仿真结果我们可以看出,该传感器可用于三维触觉检测,可同时满足三维和柔性测量的要求。该传感器的设计方法不同于当前的盔甲式的柔性触觉传感器设计,它是一个测量整体,实现了在整个测量表面连续的检测,可以作为仿机器人的皮肤,具有广阔的应用前景。

上述解耦方法和仿真结果都是基于导电橡胶具

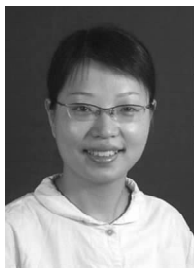
有理想特性的条件下进行的,在导电橡胶不具有理想特性的条件下,可以引入先进的人工智能算法,以消除由导电橡胶非线性、滞环等特性带来的误差,这是我们后期需要进一步研究的课题。此外,为了增加传感器的分辨率,或者随着传感器规模的增加,阻值矩阵的规模也会不断增加,这都会增加测量电路和算法的复杂度,这也是我们后期需要进一步解决的问题。

致谢:作者感谢戈瑜教授、严文法老师、宋全军教授(中科院智能所)提供的极大的帮助和技术指导。

参考文献:

[1] Yoji Yamada, Member, IEEE, Tetsuya Morizono, Yoji Umetani, and Hitoshi Takahashi, Highly. Soft Viscoelastic Robot Skin with a Contact Object-Location-Sensing Capability[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, August 2005, 52(4): 960-968.

- [2] Jin-Seok Heo, Jong-Ha Chung, Jung-Ju Lee. Tactile Sensor Arrays Using Fiber Bragg Grating Sensors[J]. Sensors and Actuators, 2006, A126: 312 - 327.
- [3] 梅涛,戈瑜,倪礼宾. 多功能阵列式触觉传感器的研究[J]. 高技术通讯,2000,10(3):53 - 56.
- [4] Zhang Zheng-yong, Kong De-yi, Mei Tao. The Preparation Method of a Flexible tactile Sensors Array for Three-dimensional Force Measurement[J]. Journal of Transduction Technology, 1004-1699 (2007)11-2382-04.
- [5] Mami Tanaka. The "Haptic Finger" a New Device for Monitoring Skin Condition[J]. Skin Research and Technology, 2003(9): 131 - 136.
- [6] Shimojo M, Namiki A, Ishikawa M. A Tactile Sensor Sheet Using Pressure Conductive Rubber with Electrical-Wires Stitched Method [J]. IEEE Sensors Journal, 2004, 5: 589 - 596.
- [7] 王敏,黄英,葛运建,等. 基于液体成型压敏导电胶的柔性皮肤的研究. 哈尔滨工业大学学报, 2006(38):1072 - 1074.
- [8] Huang Y, Fu X L, Wang M. Research on Nano-SiO<sub>2</sub>/Carbon Black Composite for Flexible Tactile Sensing[A][J]. International Conference on Information Acquisition, 2007: 260 - 264.
- [9] Shen Chunshan. Research of Three-axis Tactile Sensor Based on Pressure Conductive Rubber[C]//Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 2004(4): 3750 - 3752.
- [10] Huang Yin, Xiang B, Ming X H. Conductive Mechanism Research Based on Pressure-sensitive Conductive Composite Material for Flexible Tactile Sensing[C]//International Conference on Information and Automation China, 2008: 1614 - 1619.
- [11] Huang Yin, Liu Ping, Huang Yu. Mechanical Sensitivity Research Based on Pressure-Sensitive Conductive Composite Material for Flexible Tactile[J]. Sensor, Journal of Fudan University (Natural), 2009, 48(1): 46 - 52.
- [12] 黄英,黄攀峰,等. 新型柔性触觉传感器阵列结构设计及仿真研究[J]. 仪表技术与传感器,2008(11):4 - 7.



丁俊香(1978 -),在读博士,讲师,从事敏感材料和传感技术研究,djxgirl@sohu.com;



葛运建(1947 -),研究员,现任中科院合肥智能所机器人传感器实验室主任,中国科技大学博士生导师。主要研究方向为信息获取与处理、机器人感知系统、人机交互临场感、运动生物力学等。