DOI: 10.3901/JME.2019.10.017

基于双对角匀强电场的柔性触觉传感器研究*

张友志 吴海彬 何可耀 王浩淼 叶锦华
(福州大学机械工程及自动化学院 福州 350116)

摘要: 触觉感知是智能装备获取外部信息,并提升自身安全和人机交互共融性能的必备手段。以静电场唯一性定理为基础,提出一种能够检测接触位置的柔性触觉传感器模型。在一柔性矩形弱导电面的四周设置连续的强导电线电极,并在对角处引入偏置激励,从而在与弱导电面对角呈一定角度方向构建匀强电场。进一步通过对两组对角电极分时施加偏置激励,则可以分时在两个不同方向形成匀强电场。基于匀强电场中位置与电势的线性关系,通过获取弱导电面内某点的电势值进而确定该点的位置坐标,实现接触位置的检测。传感器采用三层结构,包括弱导电层,中间隔离层和信号引出层。采用 COMSOL 软件对导电面不同结构形状和不同接触面积对电场分布的影响进行仿真,并制作了传感器样品。仿真和试验结果表明,提出的用于检测接触位置的触觉传感器原理可行,对于 100 mm×100 mm 幅面大小的触觉传感器,具有较好的检测精度。

关键词: 触觉传感器; 接触位置检测; 匀强电场; 分时激励

中图分类号: TP212

Research on Flexible Tactile Sensor Based on Double Diagonal Uniform Planar Electric Field

ZHANG Youzhi WU Haibin HE Keyao WANG Haomiao YE Jinhua
(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116)

Abstract: Tactile perception is the necessary means for intelligent equipment to acquire external information, and improve its safety and the performance of human-machine interaction. Based on the uniqueness theorem of electrostatic field, a new flexible tactile sensor that can detect the contact position information is designed. A strong conductive line is arranged along the edge of a flexible rectangular plane with a layer of weak conductive film. A bias excitation is applied to the opposite angles of the conductive plane to construct a uniform electric field. The direction of the electric field is at a certain angle to the diagonal of the conductive plane. Furthermore, the bias excitation applied to two pairs of opposite angles alternately, so that two uniform electric fields in different direction can be alternately formed in the conductive plane. According to the linear relationship between position and potential in the uniform electric field, the coordinate of contact position can be determined by obtaining the potential of the contact point in the conducting plane. The sensor uses a three-layer structure, including a conductive layer, an intermediate isolation layer and a signal extraction layer. COMSOL multiphysics is used to simulate the different states of the electric-field distribution for different size of the plane and different contact area. A tactile sensor sample is fabricated. The simulation and experimental results show that the principle of the tactile sensor used for the contact position detection is feasible, and it has good detection accuracy for the tactile sensor of 100 mm×100 mm.

Key words: tactile sensor; contact position detection; uniform electric field; time-sharing excitation

0 前言

触觉传感器能够用于检测与外部环境接触时的位置、力、纹理、质感、温度等信息,是实现安全人机交互的重要信息来源之一^[1-3]。研制满足要求的触觉传感器是机器人发展的关键技术之一,尤

其是能够大面积贴附于机器人外表面的柔性触觉传感器^[4-5]。

触觉传感器按照结构形式可以分为阵列和非阵列结构。随着 MEMS 技术的不断发展,以及新材料的不断涌现,阵列结构的触觉传感器逐步形成了压阻、电容、压电、磁阻、光学等多种检测原理的触觉传感器^[6-8]。例如, MORTEZA 等^[9]应用 3D 直写技术在聚氨酯橡胶层内嵌入具有压阻特性的 CNTs—PA 纳米复合材料柔性导电路径,制作了可

* 国家自然科学基金资助项目(51575111, 51605093)。20180709 收到初稿, 20190105 收到修改稿

拉伸的柔性触觉传感器, 实现了力和滑动的检测。黄英等^[10]基于炭黑填充橡胶设计了一种全柔性电容式触觉传感器, 采用拼接式阵列结构, 具有良好的稳定性和灵敏度。SONG 等^[11]使用聚偏二氟乙烯膜作为敏感元件制造出一种快速响应的织物表面纹理检测传感器, 受压电材料的物理特性限制, 该传感器只能进行动态检测。PEDRO 等^[12]应用磁化的纤毛在硅衬底上制作了一种微型磁阻式触觉传感器, 能够分辨最小 333 μN 的压力。PINYO 等^[13]基于光纤设计了一种适用于微创手术的光学式触觉传感器, 该传感器全部由非金属部件组成, 具有良好的灵敏度和高分辨率。WANG 等^[14]基于银纳米纤维设计了一种可自供电、高度可拉伸且透明的摩擦电触觉传感器, 可用于微小力的检测。总体而言, 有关阵列结构触觉传感器的研究已经很多, 取得了较多的成果, 有的甚至已经成熟并进入了市场。但阵列结构触觉传感器也存在结构和信号处理复杂, 信号检测不连续, 实时信号处理能力差, 成本高等缺点, 限制了其在机器人领域的广泛应用。

相对阵列式触觉传感器而言, 有关非阵列结构触觉传感器的研究并未得到足够重视, 相关研究较少, 至今鲜有某种工作机理和结构形式的非阵列结构触觉传感器发展成熟并被广泛关注。PAN 等^[15]设计了一款基于电阻分压原理测量碰撞位置的触觉传感器, 该设计方案采用五层架构, 只用四条引线就可以测量较大表面的碰撞位置, 具有较好的实用性。但是其检测位置仍然是离散的, 也存在一定的盲区。MARKUS 等^[16]使用导线在压敏导电橡胶内“编织”成网格, 并在外部附着一层柔弹性泡沫, 制备了一种触觉传感器, 具有较好的柔性, 但存在布线复杂等问题, 仍不适于大面积使用。FRIGOLA 等^[17]设计了一款用于防护并可检测碰撞力的机器人盔甲, 通过在机械盔甲下垫上传感器, 起到一定的缓冲作用, 同时, 可以感知外力的大小。该传感器的覆盖面较广, 力检测精度较高, 但是无法准确判断出碰撞的位置。GEREON 等^[18]基于导电织物提出了一种柔性可拉伸的触觉传感器, 具有较好的包覆性, 但传感器结构复杂, 数据采集耗时。FRANCESCO 等^[19-20]基于电阻抗成像技术应用导电织物设计了一种的触觉传感器, 能够实现多点接触位置检测, 具有结构简单, 易制备, 成本低等特点。然而, 传感器的模型成像算法复杂, 硬件系统要求较高, 且位置检测空间分辨率不高。

本文在已有工作的基础上, 提出了一种新型非阵列结构的触觉传感器, 能够实现连续接触位置信息的检测^[21-22]。该传感器由三层薄膜材料构成, 结

构简单, 质量轻, 厚度小, 具有较好的包覆性, 外部仅需 5 根引线用于传感器的供电和信号传输, 信号处理简单。将该传感器包覆于机器人全身, 有助于实现机器人作业时的人机交互和安全避碰等功能。

1 触觉传感器的原理

1.1 结构模型

本文基于在同一导电平面上分时构建出横向和纵向的匀强电场, 形成梯度线性变化的电势分布, 根据匀强电场中位置与电势的线性关系, 通过获取导电平面内接触点的电势值进而确定该点的位置坐标, 实现接触位置的检测。传感器的结构模型如图 1 所示。

图 1 触觉传感器结构模型

该触觉传感器由三层薄膜结构组成。上层 L1 为四周设置有连续强导电线电极的矩形弱导电层, 其中线电极 M1 的电导率 σ_1 远大于弱导电层 M2 的电导率 σ_2 , 即 $\sigma_1 \gg \sigma_2$ 。在线电极 M1 对角处引入偏置激励, 则弱导电层 M2 内将构建出匀强电场, 形成梯度线性变化的电势分布。中层 L2 为网格状的柔性隔离层。下层 L3 为导电性良好的信号引出层, 外接 1 根信号输出线。

当外力作用于传感器表面时, 在接触点位置处, 上层 L1 发生形变, 透过中层 L2 内的网格, 与下层 L3 接触, 如图 2 所示。此时, 下层 L3 的电势值与上层 L1 接触点处的电势值相同, 通过提取下层 L3 的电势信息便可以计算出接触点在传感器表面的位置信息。

图 2 传感器受压时横截面图

因此, 若通过一定的技术手段在上层内构建出匀强电场, 形成梯度线性变化的电势分布, 便可以容易地将接触点处的电势信息转换为位置坐标信息。

1.2 构建匀强电场导电面

在一均质导电平面的两端设置两个点电极，若在两个电极间施加恒定电压，导电平面内将形成恒定电流场。由于恒定电流场中的电流不随时间变化，场内电荷分布也不随时间变化，因而电荷所产生的电场为恒定电场。恒定电流场条件下，

均质导体内部无净电荷，导体上的净电荷只能分布在导体内部的非均质处，或是不同电导率导体的分界面上。因此，导电平面内恒定电场是由电极与导电平面接触处累积的净电荷产生的，其电场分布与空间中电偶极子产生的静电场分布类似，如图3所示。

图3 正方形导电平面与菱形导电平面在两水平点电极作用下的电场线和等势线分布

由图3可知，导电平面上产生的电场和电势分布是不均匀的。导电平面内产生的电场为恒定电场，与静电场具有完全一样的性质，由静电场唯一性定理可知，若给定导电平面边界的电势分布，导电平面内的电场将唯一确定。因此，通过合理地构建导电平面边界电势分布，导电平面内可以产生匀强电场，形成均匀的电势分布。

在各向同性的线性均匀介质区域中，已知一带电系统中的电荷分布，介质中的静电场可表示为

$$\mathbf{E} = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (1)$$

式中， $\mathbf{E}$ 为电场强度， r 为到电荷元 dq 的距离， $\mathbf{e}_r$ 为指向场点的单位矢量， ϵ_0 为真空介电常数。式中积分遍及所有电荷。

静电场为无旋场，电场强度 $\mathbf{E}$ 可由电势的负梯度表示为

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi \quad (2)$$

式中， ϕ 为静电势。

因此，若已知介质中的电势分布便可以确定其电场分布，由高斯定理的微分形式可得

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_0}{\epsilon} \quad (3)$$

式中， ρ_0 为自由电荷密度， ϵ 为介电常量。

将式(2)代入式(3)，得

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho_0}{\epsilon} \quad (4)$$

式(4)为泊松方程，是介质中电势 ϕ 满足的基本方程。当 $\rho_0 = 0$ 时，方程转化为拉普拉斯方程。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (5)$$

该方程满足于没有自由电荷的均匀区域，产生电场的电荷分布在区域的边界上，区域内的电场分布通过边界条件来反映。

图4所示的均质矩形导电平面，导电平面内的电势分布 $\phi(x,y)$ 满足拉普拉斯方程。

图4 矩形导电平面边界电势分布

若给定边界电势为

$$\begin{cases} \phi(x,0) = f_1(x) & (0 < x < a) \\ \phi(x,b) = f_2(x) & (0 < x < a) \\ \phi(0,y) = g_1(y) & (0 < y < b) \\ \phi(a,y) = g_2(y) & (0 < y < b) \end{cases} \quad (6)$$

则在给定边界值的平面区域内求解拉普拉斯方程称为狄利克雷问题。利用线性特性，可将其分解为四

个简单的狄利克雷子问题之和, 如图 5 所示。

图 5 狄利克雷问题分解图

利用直角坐标系下的分离变量法, 对图 5 所示的狄利克雷问题求解, 得

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = & \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \frac{n\pi}{a} x \sinh \frac{n\pi}{a} (b-y) + \\ & \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin \frac{n\pi}{a} x \sinh \frac{n\pi}{a} y + \\ & \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sinh \frac{n\pi}{b} (a-x) \sin \frac{n\pi}{b} y + \\ & \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sinh \frac{n\pi}{b} x \sin \frac{n\pi}{b} y \end{aligned} \quad (7)$$

式中, 系数 A_n , B_n , C_n , D_n 分别为

$$\begin{cases} A_n = \frac{2}{a \sinh \frac{n\pi b}{a}} \int_0^a f_1(x) \sin \frac{n\pi}{a} x dx \\ B_n = \frac{2}{a \sinh \frac{n\pi b}{a}} \int_0^a f_2(x) \sin \frac{n\pi}{a} x dx \\ C_n = \frac{2}{b \sinh \frac{n\pi a}{b}} \int_0^b g_1(y) \sin \frac{n\pi}{b} y dy \\ D_n = \frac{2}{b \sinh \frac{n\pi a}{b}} \int_0^b g_2(y) \sin \frac{n\pi}{b} y dy \end{cases} \quad (8)$$

则式(7)、(8)为满足式(6)边界电势条件下矩形导电平面内的电势分布。

图 6 正方形导电平面边界电势分布

为简化计算, 在图 6 所示的正方形均质导电平

面内, 若沿两对角点设置线性变化的边界电势分布, 设置电势分布为

$$\begin{cases} \phi(x, 0) = \frac{1}{2}x & (0 < x < 1) \\ \phi(x, 1) = x + \frac{1}{2} & (0 < x < 1) \\ \phi(0, y) = \frac{1}{2}y & (0 < y < 1) \\ \phi(1, y) = y + \frac{1}{2} & (0 < y < 1) \end{cases} \quad (9)$$

则由式(7)~(9)可得到正方形导电平面内的电势分布 $\phi(x, y)$ 。应用 Matlab 求解方程, 得到导电平面内的电势分布如图 7 所示。

图 7 正方形导电平面内电势分布图

由图 7 可知, 正方形导电平面内沿对角线方向形成了线性梯度变化的电势分布。由此得出, 在正方形均质导电平面内, 若沿两对角点设置线性变化的边界电势分布, 则导电平面内将沿此对角线方向产生匀强电场, 形成梯度线性变化的电势分布。

采用电导率较低的正方形弱导电层, 在其四周设置强导电线电极, 并在对角处引入偏置电压, 从而构建上述边界电势。正方形导电平面的结构模型如图 8 所示。

图 8 四周设置强导电线电极的正方形导电平面结构图

该导电平面由电导率为 σ_1 的线电极 M1 和电导率为 σ_2 的弱导电层 M2 组成, M1 与 M2 接触良好。

若 $M1$ 的电导率 σ_1 远大于 $M2$ 的电导率 σ_2 ，即 $\sigma_1 \gg \sigma_2$ ，在 A 、 C 两点施加恒定偏置电压时，则绝大部分电流将由正极点 A 经 $M1$ 流向负极点 C ，线电极 $M1$ 内将由点 A 至点 C 形成线性下降的电势分布。由于 $M1$ 与 $M2$ 接触良好，弱导电层 $M2$ 的边界区域 $A'D'$ 、 $D'C'$ 和 $A'B'$ 、 $B'C'$ 也形成由点 A' 到点 C' 线性下降的电势分布。同理，若在 B 、 D 两点

间施加恒定偏置电压，则 $M2$ 的边界区域 $B'A'$ 、 $A'D'$ 和 $B'C'$ 、 $C'D'$ 将形成由点 B' 到点 D' 线性下降的电势分布。

同等条件下， $M1$ 与 $M2$ 电导率的比值不同会对导电平面内的电势分布产生影响。应用 COMSOL Multiphysics 软件对不同电导率比值的导电平面进行仿真，其内部的电场和电势分布如图 9 所示。

图 9 电导率比值不同的导电平面内的电场和电势分布

由图 9 可知， σ_1 与 σ_2 的比值越大，则导电平面内的电场分布越均匀；当 $\sigma_1 / \sigma_2 \geq 100$ 时，则 $M2$ 内能够形成较为均匀的电场分布和线性梯度变化的电势分布。

1.3 接触点位置检测

由线电极 $M1$ 和弱导电层 $M2$ 构成的正方形导电平面 $ABCD$ ，其中， $M1$ 的电导率为 σ_1 ， $M2$ 的电导率为 σ_2 。若 $\sigma_1 \gg \sigma_2$ ，在导电平面 A 、 C 两点施加恒定偏置电压时，则 $M2$ 内将形成沿 x 轴方向的匀强电场和线性梯度变化的电势分布，如图 10 所示。

图 10 中带箭头的实线为电场线，虚线为等势线，平面区域的电势可表示为

$$\phi_{(x,y)} = f_1(x,y) \quad (10)$$

图 10 x 方向电势检测原理示意图

同理，在导电平面 B 、 D 两点施加恒定偏置电压时，则 $M2$ 内将形成沿 y 轴方向的匀强电场和线性梯度变化的电势分布，如图 11 所示。

图 11 y 方向电势检测原理示意图

平面区域的电势可表示为

$$\phi_2(x, y) = f_2(x, y) \quad (11)$$

则接触点 $p(x, y)$ 在两电场中的电势可表示为

$$\begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(x, y) \\ f_2(x, y) \end{pmatrix} \quad (12)$$

由于 M2 内的电势分别沿 x 轴和 y 轴方向均匀线性分布, 所以通过测量接触点在两个电场中的电势 ϕ_1 、 ϕ_2 , 由式(12)便能容易地计算出接触点的位置坐标。其位置坐标可表示为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1(\phi_1) \\ g_2(\phi_2) \end{pmatrix} \quad (13)$$

当导电平面弯曲时, 由于导电介质厚度很小, 因弯曲带来的导电介质密度变化极小, 可认为弯曲条件下导电平面内的电场分布不变。因此, 把导电平面贴附于机器人表面, 分时在其两对角处施加一恒定偏置电压, 当机器人与外部环境发生碰撞接触时, 通过提取接触点在两个电场内的电势值, 即可计算出接触点的位置坐标信息。

2 导电面电场分布有限元分析

2.1 边界形状对导电平面电场分布的影响

基于前述的匀强电场构建理论, 在正方形导电平面内, 沿对角点设置线性变化的边界电势分布, 则导电平面内将产生匀强电场并沿对角线方向形成梯度线性变化的电势分布。下面进一步分析导电平面的边界形状对其内部电场分布的影响。

对不同形状的导电平面, 设置线电极与导电平面的电导率之比为 100:1, 在对角点处施加 1 V 电压, 应用 COMSOL Multiphysics 软件进行恒定电流场仿真, 导电平面内的电势分布如图 12 所示。

图 12 不同形状的复合导电平面恒定电流场仿真

由图 12 可知, 在导电平面线电极的对角点施加恒定电压, 弱导电层的边界形成梯度线性变化的电势分布。若导电平面的形状为具有中心对称性质的四边形(如矩形、平行四边形), 弱导电层内将产生梯度线性变化的电势分布; 若导电平面的形状为非中心对称四边形(如等腰梯形)或椭圆形, 则弱导电

层内产生的电势分布相对不均匀。因此选择具有中心对称性质的四边形形状是导电平面构建匀强电场的关键。

2.2 接触区域形状对导电平面电场分布的影响

传感器工作时, 根据接触面积的大小可分为点接触和面接触两种情况。点接触时, 由于上层 L1

与下层 L3 接触面积小, 对导电平面内电场分布影响微弱, 可忽略不计。但当面接触时, 由于层下 L3 的电导率远大于上层 L1 中弱导电层 M2 的电导率, 使接触区域的导电效果显著提高, 从而对导电平面 M2 内电场分布产生影响。

对正方形导电平面, 设置外层与内层电导率之比为 100:1, 在对角点施加 1 V 电压, 应用 COMSOL Multiphysics 软件对不同形状和面积的接触区域进行恒流场仿真, 导电平面内的电势分布如图 13 所示。

图 13 接触区域不同时复合导电平面内的电场和电势分布

对比图 13a、13b 可知, 相同接触面积时, 接触区域与导电平面的电导率比值越高, 接触时对导电平面内的电势分布影响越大。对比图 13a、13c 可知, 接触区域与导电平面的电导率比值一定时, 接触区域的面积越大, 接触时对导电平面内的电势分布影响越大。对比图 13c、13d 可知, 接触区域与非接触区域的电导率比值一定时, 接触区域的形状不同, 接触时对导电平面内的电势分布变化也不同。接触时, 由于接触区域的导电能力相对增强, 其阻碍电流通过的能力下降, 故该区域分布的等势线会相对变稀, 而总电势差一定的情况下, 等势线条数是一定的, 则非接触区域的等势线相对变密, 且在接触区域的边界处, 电势分布变化越明显。

不同形状和面积的接触区域内都存在一些在接触前后电势不变的电势不动点, 将这些点连线记为电势不动线。根据电场连续性可知, 接触区域内电势不动线的左侧区域电势较接触前变小, 而电势不动线的右侧区域的电势较接触前变大。由于传感器采集的电势为接触区域的平均电势, 因此当接触区域为圆形时, 求得电势位置误差最小。

3 触觉传感器结构设计和制作

3.1 结构设计

本文提出的触觉传感器由 3 层薄膜结构组成, 其结构如图 14 所示。

图 14 传感器结构图

上层 L1 为弱导电层, 为电导率较低的正方形 ITO-PET 导电薄膜, 并在其导电面四周采用电导率较高的导电银浆印刷正方形柔性电路, 四个对角处设有金属电极; 中层 L2 为隔离层, 为具有一定厚

度的隔离膜,按照所需规格剪裁成网格,在其两侧均匀涂刷压敏胶,能将上下层牢固黏连;下层 L3 为信号输出层,为电导率较高的 ITO-PET 导电薄膜,外部接有一根信号线。

3.2 样品制作

触觉传感器上层取方阻 $100\ \Omega/\text{cm}^2$, 厚度 $0.175\ \text{mm}$ (其中 ITO 膜层厚度为 $70\ \text{nm}$) 的 ITO-PET 导电膜,使用电导率约为 $2.4 \times 10^7\ \text{S/m}$ 的导电银浆在 ITO-PET 导电膜边沿印刷宽 $2\ \text{mm}$ 的正方形柔性电路,在导电膜的四个对角处分别设置铝质电极。触觉传感器中层取厚度 $0.3\ \text{mm}$ 的隔离膜剪裁成网格状薄片,其中网孔规格为 $20\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ 。触觉传感器下层取厚度为 $0.1\ \text{mm}$,导电性良好的铝箔,在铝箔的边沿设置 1 根引线作为信号线输出电压信息。

将三层薄膜剪裁成 $110\ \text{mm} \times 110\ \text{mm}$ 、对齐并紧密粘贴,传感器样品如图 15 所示。

图 15 传感器样品图

4 试验

4.1 触觉传感器接触试验

采用传感器的上层导电平面进行接触位置检测试验,其有效检测区域为 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ 的菱形。采用 GPD-3303S 可编程线性直流电源提供直流偏置电压,设置电极间电压为 $500\ \text{mV}$,试验装置如图 16 所示。当在 x 轴方向两电极间施加偏置电压时,在导电层的检测范围内选取直线 $x=30\ \text{mm}$, $x=50\ \text{mm}$, $x=70\ \text{mm}$, $x=90\ \text{mm}$, $x=110\ \text{mm}$ 一系列点,用电压表探针直接去按压给定位置(看成点接触)并读出电压值;当在 Y 轴方向两电极间施加偏置电压时,在导电层的检测范围内选取直线 $y=30\ \text{mm}$, $y=50\ \text{mm}$, $y=70\ \text{mm}$, $y=90\ \text{mm}$, $y=110\ \text{mm}$ 一系列点,用电压表探针直接去按压给定位置并读出电压

值。然后按照式(13)将测得的电压值转换成位置坐标,并与实际位置坐标进行对比,试验结果如图 17 所示。

图 16 试验装置

(a) x 轴方向电极施加偏置电压

(b) y 轴方向施加偏置电压

图 17 触觉传感器点接触试验结果

由图 17 可知,检测区域内 X 轴方向最大位置误差不超过 $3.8\ \text{mm}$, Y 轴方向最大位置误差不超过 $3.2\ \text{mm}$ 。引起误差的主要原因是银浆走线电路涂刷

均匀度不够理想, 产生电路压降分布不均匀, 导致导电平面内电势梯度分布不均匀。此外, ITO 导电材料内面电阻不均匀也会导致导电平面内局部区域电势分布不均匀。

当接触形状为半径 5 mm 的圆形区域时, 选取平面上均匀分布的 9 点作为测量点, 测得位置坐标与实际位置(取圆形区域的中心)的对比如图 18 所示。

图 18 触觉传感器面接触试验结果

由图 18 可知, 所选各点的面接触位置误差均小于接触区域的半径, 测量得到的位置仍然在接触区域内, 因此该传感器能够有效的工作。

4.2 触觉传感器的信号处理

本文基于 PIC18F25K80 芯片, 搭建触觉传感器信号处理电路, 实现对传感器进行双路直流恒流输入切换, 输出信号的采集、放大、滤波、A/D 转换以及外部通讯等功能。信号处理电路采用外部电池供电, 方便传感器的安装。应用 LabVIEW 开发了触觉传感器输出显示模块, 实现了传感器接触位置信息的动态显示功能。将触觉传感器分别贴附于平面板和曲面板进行接触位置信息动态显示试验, 试验装置如图 19、20 所示。

图 19 平面纸板上位置检测动态显示

图 20 曲面纸板上位置检测动态显示

试验表明, 对贴附在平面板和曲率半径为 200 mm 的曲面板上的触觉传感器, 使用手指进行接触测试时, 传感器系统都能实时地将接触位置信息在显示屏上显示出来。

5 结论

基于静电场唯一性定理设计了一种能够检测接触位置信息的柔性薄膜面电场触觉传感器。通过对传感器导电平面的结构设计, 构建适当的边界电势分布, 实现了在同一导电平面内分时形成两个方向的匀强电场。基于匀强电场中位置与电势的线性关系, 通过获取弱导电面内某点的电势值进而确定该点的位置坐标, 实现接触位置的检测。本文建立了传感器的理论模型, 分析了导电平面结构形状以及接触区域的面积、形状对电场分布的影响。提出了 3 层薄膜结构设计方案, 制作了传感器样品, 对传感器样品进行点接触和面接触试验。搭建了触觉传感器信号处理电路, 进行了接触位置信息动态显示试验。试验结果表明, 本文设计的触觉传感器原理可行, 具有较好的检测精度, 结构与信号处理简单, 质量轻, 有较好的柔性, 易于大面积覆盖于机器人表面且信号处理电路简单, 可以为安全人机交互提供必要的信息支撑。

参 考 文 献

- [1] ALEX C, LIU J, BAO Z. Pursuing prosthetic electronic skin[J]. Nature Materials, 2016, 15(9): 937-950.
 - [2] RAVINDER S, MAURIZIO V, GORDON C, et al. Directions toward effective utilization of tactile skin: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(11): 4121-4138.
 - [3] 曹建国, 周建辉, 缪存孝, 等. 电子皮肤触觉传感器研究进展与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(1): 1-13.
- CAO Jianguo, ZHOU Jianhui, MIAO Cunxiao, et al. Research progress and development strategy on tactile

- sensors for e-skin[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(1): 1-13.
- [4] WANG X, GU Y, XIONG Z, et al. Silk-molded flexible, ultrasensitive, and highly stable electronic skin for monitoring human physiological signals[J]. Advanced Materials, 2014, 26(9): 1336-1342.
- [5] 曹政才, 付宜利, 王树国. 新型机器人敏感皮肤信号处理系统[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 21-25.
CAO Zhengcai, FU Yili, WANG Shuguo. Signal processing system of the new robotics sensitive skin[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 21-25.
- [6] HIROSHI Y, MICHIKO N, KAZUHIRO W, et al. Tactile sensing for object identification based on hetero-core fiber optics[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 247(15): 98-104.
- [7] SEMINARA L, CAPURRO M, CIRILLO P, et al. Electromechanical characterization of piezoelectric PVDF polymer films for tactile sensors in robotics applications[J]. Sensors and Actuators: A, 2011, 169(1): 49-58.
- [8] 萧伟, 孙富春, 刘华平. 机器人灵巧手的触觉分析与建模[J]. 机器人, 2013, 35(4): 394-401.
XIAO Wei, SUN Fuchun, LIU Huaping. Tactile analysis and modeling of dextrous robotic hand[J]. Robot, 2013, 35(4): 394-401.
- [9] MORTEZA V, ERIK D, JAE W. Force and slip detection with direct-write compliant tactile sensor using multi-walled carbon nanotube/polymer composites[J]. Sensor and Actuators A: Physical, 2013, 195(1): 90-97.
- [10] 黄英, 郭小辉, 刘家俊, 等. 可拼接式全柔性电容触觉阵列传感器设计与试验[J]. 机器人, 2015, 37(2): 136-141.
HUANG Ying, GUO Xiaohui, LIU Jiajun, et al. Expandable fully compliant capacitive tactile sensing array: Design and experiment[J]. Robot, 2015, 37(2): 136-141.
- [11] SONG A G, HAN Y, HU H, et al. A novel texture sensor for fabric texture measurement and classification[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(7): 1739-1747.
- [12] PEDRO R, MOHAMMED K, AHMED K, et al. Bioinspired ciliary force sensor for robotic platforms[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(2): 971-976.
- [13] PINYO P, LIU H B, LAKMAL D, et al. Miniature 3-axis distal force sensor for minimally invasive surgical palpation[J]. IEEE Asme Transaction on Mechatronics, 2011, 17(4): 646-656.
- [14] WANG Xiandi, ZHANG Yufei, ZHANG Xiaojia, et al. A highly stretchable transparent self-powered triboelectric tactile sensor with metallized nanofibers for wearable electronics[J]. Advanced Materials, 2018, 30(2): 1-8.
- [15] PAN Z, ZHU Z. Flexible full-body tactile sensor of low cost and minimal output connections for service robot[J]. Industrial Robot, 2005, 32(6): 485-491.
- [16] MARKUS F, NORBERT E, ERIK S. Tactile sensing: A key technology for safe physical human robot interaction[C]// ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, March 06-09, 2011, Lausanne, Switzerland. New York: ACM, 2011: 139-140.
- [17] FRIGOLA M, CASALS A, AMAT J. Human-robot interaction based on a sensitive bumper skin[C]// IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 09-15, 2006, Beijing, China. New York: IEEE, 2006: 283-287.
- [18] GEREON H, BUSCHER R, KOIVA R, et al. Flexible and stretchable fabric-based tactile sensor[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 63(3): 244-252.
- [19] FRANCESCO V, PAOLO F, KENJI S. A deformable smart skin for continuous sensing based on electrical impedance tomography[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1928-1949.
- [20] DAVID S, DAVID R, MANUCHEHR S, et al. Electrical impedance tomography for artificial sensitive robotic skin: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(4): 2001-2016.
- [21] WU H B, SU Y, SHI J, et al. A new robot skin for force and position detection[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2014, 41(6): 534-542.
- [22] WU H B, CHEN J, SU Y, et al. New tactile sensor for position detection based on distributed planar electric field[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 242(1): 146-161.

作者简介: 张友志, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人触觉感知。

E-mail: 604400678@qq.com

吴海彬(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人触觉传感器(人工皮肤)、提高机器人安全性的技术与方法。

E-mail: wuhb@fzu.edu.cn