

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl<sup>7</sup>  
B25J 13/08



## [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200310106202.6

[43] 公开日 2004年10月27日

[11] 公开号 CN 1539604A

[22] 申请日 2003.11.1

[21] 申请号 200310106202.6

[71] 申请人 中国科学院合肥智能机械研究所  
地址 230031 安徽省合肥市西郊董铺 1130 号  
信箱

[72] 发明人 孔德义 梅 涛 汪小华 张正勇  
张 涛 路 巍 王 锐 倪 林  
陈 茅 陶永春 张成梅 胡圣军

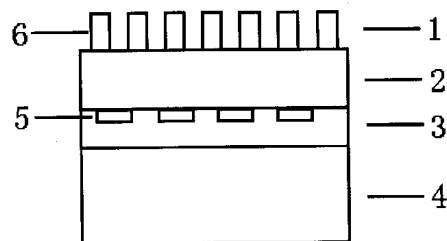
[74] 专利代理机构 安徽省合肥新安专利代理有限  
责任公司  
代理人 赵晓薇

权利要求书 3 页 说明书 13 页 附图 2 页

[54] 发明名称 一种柔性触觉传感器及触觉信息检测方法

[57] 摘要

一种柔性触觉传感器及触觉信息检测方法。该传感器由磁性橡胶工作面、弹性夹层、磁敏阵列、玻璃衬底和信号处理电路组成，其磁性橡胶工作面和弹性夹层能通过柔性变形自适应目标物体的表面形状，同时引起磁场空间分布的改变，进而改变了磁敏阵列中各磁敏单元的输出电流。通过神经网络技术标定出磁敏阵列中各磁敏单元的输出电流与磁性橡胶变形量之间的定量关系，可以获取传感器与未知物体发生“软接触”时的接触位置、接触力的空间分布以及目标物体的局部形状等触觉信息。该柔性触觉传感器可应用于机器人技术领域，能安装在机械手夹持器表面或机器人手指的指面等位置，提高抓取和传送等过程的可靠性，也可安装在移动式机器人的身体周围用于避障。



1、一种柔性触觉传感器，由传感器探头和信号处理电路这两部分组成，其特征在于：所述的第一部分传感器探头主要包括磁性橡胶（1）、弹性夹层（2）、磁敏阵列（3）和玻璃衬底（4）；

磁性橡胶（1）位于传感器探头的最外层，它作为工作面直接与被测物体接触，在磁性橡胶（1）工作面上没有任何电子器件和电极，因而不会出现因接触和抓取目标物体可能导致的电子器件及其线路损坏情况；

磁性橡胶（1）的下面是弹性夹层（2），它是磁性橡胶（1）和磁敏阵列（3）之间的缓冲层；

磁性橡胶（1）和弹性夹层（2）均为柔性材料，在外力作用下较容易变形，但发生变形时磁性橡胶（1）的厚度并不改变，而弹性夹层（2）在厚度方向上可被压缩，因此弹性夹层（2）为磁性橡胶（1）工作面提供了一个较大的变形空间以自适应被测物体的局部表面形状，这使得传感器能够以“软接触”方式工作，能有效避免“硬接触”可能导致的被测物体表面以及传感器本身的损伤，同时由于磁性橡胶（1）和弹性夹层（2）能产生自适应目标物体被接触部分表面形状的受压变形，增大了接触面积，使得接触和抓取过程更加可靠，并且还能够获取更多的力学信息；

弹性夹层（2）的下面是磁敏阵列（3），阵列中的磁敏单元（5）是采用刚性的硅材料制作而成的磁敏二极管或磁敏三极管，用来检测磁敏阵列（3）表面附近的磁场强度分布，同霍尔元件相比，磁敏二极管和磁敏三极管具有较高的灵敏度，其制作工艺与集成电路工艺兼容，集成度较高，能够实现较高的触觉空间分辨率；

玻璃衬底（4）是一种与硅的热膨胀系数非常接近的硼硅玻璃材料，位于传感器探头的最底层，主要起支撑、隔热、绝缘作用；

玻璃衬底（4）通过静电封接技术键合在磁敏阵列（3）的背面，弹性夹层（2）和磁性橡胶（1）则通过微组装技术依次安装在磁敏阵列（3）的正面，磁性橡胶（1）工作面或弹性夹层（2）一旦损伤或失去弹性，可仅对这两部分单独进行拆卸更换，不用更换磁敏阵列（3），但更换磁性橡胶（1）或弹性夹层（2）后需要重新对磁敏阵列（3）的输出信号进行标定；

所述的柔性触觉传感器第二部分信号处理电路主要包括电流放大电路、开关选通电路、A/D 和 D/A 转换电路、信号比较电路、单片机、存储器、显示电路、电源，各电路之间的结构连接关系是：

传感器探头阵列中的磁敏二极管或磁敏三极管信号输出，连接到信号处理电路中的电流放大电路，信号经该电路放大后输出连接到带有开关选通电路的 A/D 转换电路和信号比较电路，将放大后的信号转换为数字量，并输出连接到单片机、存储器、显示电路，由单片机进行处理，完成磁敏单元（5）输出信号的采集和解释，并可通过显示电路显示、D/A 转换电路输出连接和存入存储器；

传感器探头磁敏阵列（3）中的每个磁敏单元（5）都通过上述方式连接信号处理电路，各个磁敏单元（5）通过开关选通电路进行选择，依次对磁敏阵列（3）中的每个磁敏单元（5）的输出信号进行处理，信号处理电路中的所有电路和元件都通过电源供电和导线连接，传感器探头和信号处理电路连接组装在一起。

2、根据权利要求 1 所述的一种柔性触觉传感器对触觉信息检测的方法，其特征在于：柔性触觉传感器对触觉信息检测的方法包括传感器制作方法和传感器对触觉信息的测定方法，所述的传感器制作方法如下：

(1) 根据特定应用领域的需求, 确定传感器探头的工作面尺寸、空间分辨率和灵敏度, 其中传感器探头的工作面尺寸主要取决于磁敏阵列(3)的平面尺寸;

磁敏阵列(3)采用微电子技术制作, 其平面尺寸可以很小, 但单个磁敏阵列(3)的最大尺寸不超过单个硅片的平面尺寸;

小型柔性触觉传感器探头的结构中必须采用小尺寸的磁敏阵列(3), 最小的柔性触觉传感器甚至能够安装在机器人的指面, 为机器人提供丰富的触觉信息;

对于较大的柔性触觉传感器, 在其探头的结构中需要采用大尺寸的磁敏阵列(3), 因此在工艺条件许可的前提下可以挑选直径较大的硅片来制作大尺寸的磁敏阵列(3), 或者通过混合集成的方式将数个磁敏阵列(3)组装成一个较大的“复合”触觉敏感阵列, 由此制作出的大尺寸柔性触觉传感器可安装在机械臂末端的夹持器表面, 用于无损地抓取和传送较大的物体, 同时提供力学反馈控制信号, 提高抓取的可靠性;

(2) 根据传感器探头的尺寸要求, 确定磁敏阵列(3)的平面尺寸, 并结合工艺条件确定单个磁敏阵列(3)的尺寸以及是否需要采用混合集成方式组成一个“复合”磁敏阵列(3);

(3) 根据已选定的磁敏阵列(3)的平面尺寸, 确定弹性夹层(2)、磁性橡胶(1)和玻璃衬底(4)的平面尺寸;

(4) 根据空间分辨率的要求确定磁敏单元(5)的最大尺寸, 实际制作的磁敏单元(5)可以小于该尺寸以提高空间分辨率;

(5) 根据灵敏度的要求确定磁敏单元(5)是采用磁敏二极管还是采用磁敏三极管, 与磁敏二极管相比, 磁敏三极管具有更高的灵敏度, 但制作工艺更加复杂;

当对灵敏度的要求不是很高时, 可选用磁敏二极管作为磁敏单元(5)以降低工艺制作难度, 当要求传感器具有很高的触觉灵敏度时, 可选用磁敏三极管作为磁敏单元(5);

当采用磁敏三极管仍然难以达到灵敏度的要求时, 在满足一定的触觉空间分辨率的前提下, 可将数个相邻的磁敏二极管或磁敏三极管组成一个“复合”磁敏单元(5), 再由这些“复合”磁敏单元(5)构成整个磁敏阵列(3), 采用这种方法能够检测出非常微弱的磁场变化, 具有很高的触觉灵敏度;

(6) 根据已选定的磁敏单元(5)的灵敏度, 通过理论计算确定弹性夹层(2)的厚度、磁性橡胶(1)的厚度以及磁性橡胶(1)表面附近的最低磁感应强度;

(7) 采用有限元分析方法对磁性橡胶(1)和弹性夹层(2)的受力变形以及磁性橡胶(1)变形后的空间磁场的重新分布进行数值计算, 进而完成对磁性橡胶(1)和弹性夹层(2)的材料参数和结构参数的优化设计;

在传感器探头中, 磁性橡胶(1)工作面、弹性夹层(2)、磁敏阵列(3)和玻璃衬底(4)的制作工艺相互独立, 因而在磁性橡胶(1)和弹性夹层(2)的材料参数和结构参数确定以后, 即可同步进行磁性橡胶(1)工作面、弹性夹层(2)、磁敏阵列(3)和玻璃衬底(4)这四部分的单独制作, 全部制作完成后再组装成传感器探头, 这有利于提高成品率, 同时也使得该传感器探头的制作工艺较为灵活;

(8) 采用微电子技术制作磁敏阵列(3), 包括版图设计、制版、工艺流水、芯片封装、测试等;

(9) 采用静电封接技术将磁敏阵列(3)与玻璃衬底(4)键合在一起;

(10) 采用微加工技术制作弹性夹层(2),并将其安装在磁敏阵列(3)表面;

(11) 选用质地均匀且具有较大柔性的永磁性橡胶材料,将其加工成所需尺寸要求的磁性橡胶(1)工作面,要求磁性橡胶(1)产生的磁力线方向与工作面的法线方向相一致,这样能够保证磁敏阵列(3)平面与磁性橡胶(1)的磁极相垂直,从而提高传感器的灵敏度;

对于磁力线方向与橡胶面垂直的磁性橡胶(1),可以直接将一块完整的磁性橡胶(1)组装在弹性夹层(2)表面;

对于磁力线方向与橡胶面平行的磁性橡胶(1),需要先采用微加工技术将其分离成多个同样大小的磁性橡胶单元(6),再将这些分立的磁性橡胶单元(6)旋转90°后均匀地组装在弹性夹层(2)表面,从而形成一个磁性橡胶单元(6)阵列,其中所有磁性橡胶单元(6)的磁极都垂直于磁敏阵列(3);

(12) 采用电子线路技术制作信号处理电路,并与传感器探头进行连接调试,其中信号处理电路部分包括电源、A/D和D/A转换电路、开关选通电路、电流放大电路、信号比较电路、单片机、存储器、显示电路;

(13) 对传感器进行标定,即通过信号处理电路依次提取和处理磁敏阵列(3)中每个磁敏单元(5)在传感器探头接触已知目标物体前后的输出电流信号,并采用神经网络技术对这些信号进行处理,将其解释成相应的触觉信号;

柔性触觉传感器具有较高的灵敏度和空间分辨率,其工作面能通过柔性变形自适应目标物体的表面形状,能够“软接触”地获取接触位置、接触力的空间分布以及目标物体的局部形状等触觉信息;

所述的传感器对触觉信息测定的方法是:

传感器探头的最外层磁性橡胶(1)是一种永磁材料,在其附近空间存在着一定的磁场分布,位于弹性夹层(2)下面的磁敏阵列(3)对外界磁场较为敏感,阵列中每个磁敏单元(5)的工作电流均会随着磁感应强度的变化而相应改变,因此磁性橡胶(1)产生的磁场影响着每个磁敏单元(5)的工作电流;

当传感器探头未接触任何物体时,磁性橡胶(1)和弹性夹层(2)不会发生任何形变,因此磁性橡胶(1)附近的磁场分布不变,此时磁敏阵列中所有磁敏单元(5)与磁性橡胶(1)面的垂直距离均保持着初始状态的固定值,每个磁敏单元(5)处的磁感应强度不变,它们的工作电流也不变;

当传感器探头与目标物体接触时,磁性橡胶(1)工作面受力向内凹进变形并压缩弹性夹层(2),使得与接触位置相对应的磁敏单元(5)与磁性橡胶(1)工作面的垂直距离缩短,并导致这些磁敏单元(5)处的磁感应强度增强,从而使得它们的工作电流产生较为显著的变化,通过检测磁敏阵列(3)中每个磁敏单元(5)的工作电流变化情况,即可获取接触位置、接触力的空间分布以及目标物体的局部形状等触觉信息。

## 一种柔性触觉传感器及触觉信息检测方法

### 技术领域

本发明涉及机器人传感器领域，特别涉及一种柔性触觉传感器及触觉信息检测方法。该传感器能自适应目标物体的表面形状，研制成功后可应用于机器人技术领域，能安装在机械手夹持器表面或机器人手指的指面等位置，“软接触”地获取接触位置、接触力的空间分布以及目标物体的局部形状等触觉信息，提高抓取和传送等过程的可靠性，也可安装在移动式机器人的身体周围用于避障。

### 背景技术

触觉传感器是机器人极其重要的传感器之一，根据触觉传感器提供的信息，机器人可对目标物体进行抓取，并可进一步感知它的形状、软硬等物理性质。触觉传感器的一个重要发展趋势是要求它具有一定的柔性，即希望它的工作面能像人的皮肤那样柔软且富有弹性，藉此通过变形自适应目标物体的表面形状，增大接触面，这样一方面有利于更加牢固可靠地抓握目标物体，另一方面还可以获取较多的触觉信息。

早期的触觉传感器主要有机械式触觉传感器和弹性式触觉传感器两种，它们体积较大，空间分辨率较低，并且采用“硬接触”工作方式，即传感器工作面不能产生柔性变形以自适应目标物体的表面形状，因此它们在机器人技术领域难以得到较为广泛的应用。

随着传感器技术的发展，出现了压阻式、电容式和光学式三种触觉传感器。

压阻式触觉传感器一般采用在弹性体结构中贴应变片的方法，其缺点是传感器的体积难以进一步缩小，一致性和精度都较差。压阻式触觉传感器还可以采用半导体工艺直接在硅片上制作，其精度和一致性有了很大改善，体积也大大减小，但由于它采用双面加工工艺制作，因而不能与半导体集成电路工艺完全兼容，其触觉空间分辨率也难以进一步提高。采用这两种方法制作的压阻式触觉传感器也是采用“硬接触”工作方式。

电容式触觉传感器在接触到目标物体时，其中的一个电极会发生移动，从而引起电容量的改变，但它接触变形较小，基本上不能自适应目标物体的表面形状，因此属于“硬接触”式触觉传感器，并且在电容式触觉传感器中存在可动电极，其寿命不是很长，可靠性也不是很高。

光学式触觉传感器主要是指光纤触觉传感器，美国曾制作出一种内置光纤的椭球状柔性触觉传感器，它采用“软接触”工作方式，其工作面具有较大的接触变形，能够自适应目标物体的表面形状，不过它仅能通过检测自身的变形量计算出目标物体的表面形状，却不能计算出接触力的大小及分布，并且光学式触觉传感器的系统均较为复杂，除了传感器本身外，还需外照明光纤、微型 CCD 以及用于图像处理的高速计算机等，因此难以小型化。

除了上述触觉传感器以外，国内最近研制出一种基于真空微电子技术的新颖触觉传感器，它有很高的触觉空间分辨率和较高的灵敏度，但也是采用“硬接触”工作方式，接触变形小，并且存在可动电极，其寿命及长期稳定性还有待改善。

此外，日本研制出一种无线型柔性触觉传感器，其敏感单元本身采用无线方式工作，不过需要位于敏感单元底部的线圈阵列通过互感方式为其提供电能，同时取出敏感信号，将其传递给与线圈阵列相连的计算机中进行处理。这种传感器在设计和使用方面均不是很灵活，尺寸过大，仅单个功率接收线圈的直径就达到 22mm，空间分辨率很低，并且敏感元件依赖于其底部的与计算机相连的线圈阵列，因此它并不是一种真正意义上采用无线方式工作的触觉传感器。该传感器目前只制作出原理演示样机，并未开发出可实用化的产品。

## 发明内容

鉴于现有各种触觉传感器的一些不足之处，本发明目的是提出了一种新的柔性触觉传感器及触觉信息检测方法，该传感器具有较高的灵敏度和空间分辨率，其工作面能通过柔性变形自适应目标物体的表面形状，能够“软接触”地获取接触位置、接触力的空间分布以及目标物体的局部形状等触觉信息。

本发明的技术内容是一种柔性触觉传感器，由传感器探头和信号处理电路这两部分组成，其特征在于：

传感器探头主要包括磁性橡胶（1）、弹性夹层（2）、磁敏阵列（3）和玻璃衬底（4）；

磁性橡胶（1）位于传感器探头的最外层，它作为工作面直接与被测物体接触，在磁性橡胶（1）工作面上没有任何电子器件和电极，因而不会出现因接触和抓取目标物体可能导致的电子器件及其线路损坏情况，因此可靠性较好；

磁性橡胶（1）的下面是弹性夹层（2），它是磁性橡胶（1）和磁敏阵列（3）之间的缓冲层；

磁性橡胶（1）和弹性夹层（2）均为柔性材料，在外力作用下较容易变形，但发生变形时磁性橡胶（1）的厚度并不改变，而弹性夹层（2）在厚度方向上可被压缩，因此弹性夹层（2）为磁性橡胶（1）工作面提供了一个较大的变形空间以自适应被测物体的局部表面形状，这使得传感器能够以“软接触”方式工作，因而能有效避免“硬接触”可能导致的被测物体表面以及传感器本身的损伤，同时由于磁性橡胶（1）和弹性夹层（2）能产生自适应目标物体被接触部分表面形状的受压变形，因而增大了接触面积，使得接触和抓取过程更加可靠，并且还能够在获取更多的力学信息；

弹性夹层（2）的下面是磁敏阵列（3），阵列中的磁敏单元（5）是采用刚性的硅材料制作而成的磁敏二极管或磁敏三极管，用来检测磁敏阵列（3）表面附近的磁场强度分布，同霍尔元件相比，磁敏二极管和磁敏三极管具有较高的灵敏度，并且其制作工艺与集成电路工艺兼容，因此集成度较高，即磁敏阵列（3）中的磁敏单元（5）密度较高，因而能够实现较高的触觉空间分辨率；

玻璃衬底（4）是一种与硅的热膨胀系数非常接近的硼硅玻璃材料，位于传感器探头的最底层，主要起支撑、隔热、绝缘作用；

玻璃衬底（4）通过静电封接技术键合在磁敏阵列（3）的背面，弹性夹层（2）和磁性橡胶（1）则通过微组装技术依次安装在磁敏阵列（3）的正面，磁性橡胶（1）工作面或弹性夹层（2）一旦损伤或失去弹性，可仅对这两部分单独进行拆卸更换，不用更换磁敏阵列（3），因此维护方便，维护成本低廉，但更换磁性橡胶（1）或弹性夹层（2）后需要重新对磁敏阵列（3）的输出信号进行标定；

所述的柔性触觉传感器第二部分信号处理电路主要包括电流放大电路、开关选通电路、A/D 和 D/A 转换电路、信号比较电路、单片机、存储器、显示电路、电源，各电路之间的结构连接关系是：

传感器探头中的磁敏二极管或磁敏三极管信号输出，连接到信号处理电路中的电流放大电路，信号经该电路放大后输出连接到带有开关选通电路的 A/D 转换电路和信号比较电路，将放大后的信号转换为数字量，并输出连接到单片机、存储器、显示电路，由单片机进行处理，完成磁敏单元（5）输出信号的采集和解释，并可通过显示电路显示、D/A 转换电路输出连接和存入存储器；

传感器探头磁敏阵列（3）中的每个磁敏单元（5）都通过上述方式连接信号处理电路，各个磁敏单元（5）通过开关选通电路进行选择，依次对磁敏阵列（3）中的每个磁敏单元（5）的输出信号进行处理，信号处理电路中的所有电路和元件都通过电源供电和导线连接，传感器探头和信号处理电路连接组装在一起。

开关选通电路在单片机的控制下依次提取磁敏阵列（3）中每个磁敏单元（5）的输出电流信号，经电流放大电路加以放大，再经过 A/D 转换后将数据存储于存储器中；信号比较电路在单片机的控制下对传感器接触目标物体后的输出信号与接触目标物体前存储于存储器中的信号进行比较，并将比较的结果解释成一个完整的触觉信号，再通过 D/A 转换电路和显示电路显示出触觉信息。

所述的传感器的制作方法是：

1) 根据特定应用领域的需求，确定传感器探头的工作面尺寸、空间分辨率和灵敏度，其中传感器探头的工作面尺寸主要取决于磁敏阵列（3）的平面尺寸；

磁敏阵列（3）采用微电子技术制作，其平面尺寸可以很小，但单个磁敏阵列（3）的最大尺寸不超过单个硅片的平面尺寸；

小型柔性触觉传感器探头的结构中必须采用小尺寸的磁敏阵列（3），最小的柔性触觉传感器甚至能够安装在机器人的指面，为机器人提供非常丰富的触觉信息；



对于较大的柔性触觉传感器，在其探头的结构中需要采用大尺寸的磁敏阵列（3），因此在工艺条件许可的前提下可以挑选直径较大的硅片来制作大尺寸的磁敏阵列（3），或者通过混合集成的方式将数个磁敏阵列（3）组装成一个较大的“复合”触觉敏感阵列，由此制作出的大尺寸柔性触觉传感器可安装在机械臂末端的夹持器表面，用于无损地抓取和传送较大的物体，同时提供力学反馈控制信号，提高抓取的可靠性；

2) 根据传感器探头的尺寸要求，确定磁敏阵列（3）的平面尺寸，并结合工艺条件确定单个磁敏阵列（3）的尺寸以及是否需要采用混合集成方式组成一个“复合”磁敏阵列（3）；

3) 根据已选定的磁敏阵列（3）的平面尺寸，确定弹性夹层（2）、磁性橡胶（1）和玻璃衬底（4）的平面尺寸；

4) 根据空间分辨率的要求确定磁敏单元（5）的最大尺寸，实际制作的磁敏单元（5）可以小于该尺寸以提高空间分辨率；

5) 根据灵敏度的要求确定磁敏单元（5）是采用磁敏二极管还是采用磁敏三极管，与磁敏二极管相比，磁敏三极管具有更高的灵敏度，但制作工艺更加复杂；

当对灵敏度的要求不是很高时，可选用磁敏二极管作为磁敏单元（5）以降低工艺制作难度，当要求传感器具有较高的触觉灵敏度时，可选用磁敏三极管作为磁敏单元（5）；

当采用磁敏三极管仍然难以达到灵敏度的要求时，在满足一定的触觉空间分辨率的前提下，可将数个相邻的磁敏二极管或磁敏三极管组成一个“复合”磁敏单元（5），再由这些“复合”磁敏单元（5）构成整个磁敏阵列（3），采用这种方法能够检测出非常微弱的磁场变化，具有很高的触觉灵敏度；

6) 根据已选定的磁敏单元（5）的灵敏度，通过理论计算确定弹性夹层（2）的厚度、磁性橡胶（1）的厚度以及磁性橡胶（1）表面附近的最低磁感应强度；

7) 采用有限元分析方法对磁性橡胶（1）和弹性夹层（2）的受力变形以及磁性橡胶（1）变形后的空间磁场的重新分布进行数值计算，进而完成对磁性橡胶（1）和弹性夹层（2）的材料参数和结构参数的优化设计；

在传感器探头中，磁性橡胶（1）工作面、弹性夹层（2）、磁敏阵列（3）和玻璃衬底（4）的制作工艺相互独立，因而在磁性橡胶（1）和弹性夹层（2）的材料参数和结构参数确定以后，即可同步进行磁性橡胶（1）工作面、弹性夹层（2）、磁敏阵列（3）和玻璃衬底（4）这四部分的单独制作，全部制作完成后再组装成传感器探头，这有利于提高成品率，同时也使得该传感器探头的制作工艺较为灵活；

8) 采用微电子技术制作磁敏阵列（3），包括版图设计、制版、工艺流水、芯片封装、测试等；

9) 采用静电封接技术将磁敏阵列（3）与玻璃衬底（4）键合在一起；

10) 采用微加工技术制作弹性夹层（2），并将其安装在磁敏阵列（3）表面；

11) 选用质地均匀且具有较大柔性的永磁性橡胶材料，将其加工成所需尺寸要求的磁性橡胶（1）工作面，要求磁性橡胶（1）产生的磁力线方向与工作面的法线方向相一致，这样能够保证磁敏阵列（3）平面与磁性橡胶（1）的磁极相垂直，从而提高传感器的灵敏度；

对于磁力线方向与橡胶面垂直的磁性橡胶（1），可以直接将一块完整的磁性橡胶（1）组装在弹性夹层（2）表面；

对于磁力线方向与橡胶面平行的磁性橡胶（1），需要先采用微加工技术将其分离成多个同样大小的磁性橡胶单元（6），再将这些分立的磁性橡胶单元（6）旋转 90°后均匀地组装在弹性夹层（2）表面，从而形成一个磁性橡胶单元（6）阵列，其中所有磁性橡胶单元（6）的磁极都垂直于磁敏阵列（3）；

12) 采用电子线路技术制作信号处理电路，并与传感器探头进行连接调试，其中信号处理电路部分包括电源、A/D 和 D/A 转换电路、开关选通电路、电流放大电路、信号比较电路、单片机、存储器、显示电路；

13) 对传感器进行标定，即通过信号处理电路依次提取和处理磁敏阵列（3）中每个磁敏单元（5）在传感器探头接触已知目标物体前后的输出电流信号，并采用神经网络技术对

这些信号进行处理，将其解释成相应的触觉信号。

所述的传感器对触觉信息进行测定的方法是：

传感器探头的最外层磁性橡胶（1）是一种永磁材料，在其附近空间存在着一定的磁场分布，位于弹性夹层（2）下面的磁敏阵列（3）对外界磁场较为敏感，阵列中每个磁敏单元（5）的工作电流均会随着磁感应强度的变化而相应改变，因此磁性橡胶（1）产生的磁场影响着每个磁敏单元（5）的工作电流；

当传感器探头未接触任何物体时，磁性橡胶（1）和弹性夹层（2）不会发生任何形变，因此磁性橡胶（1）附近的空间磁场分布不变，此时磁敏阵列中所有磁敏单元（5）与磁性橡胶（1）面的垂直距离均保持着初始状态的固定值，每个磁敏单元（5）处的磁感应强度不变，它们的工作电流也不变；

当传感器探头与目标物体接触时，磁性橡胶（1）工作面受力向内凹进变形并压缩弹性夹层（2），使得与接触位置相对应的磁敏单元（5）与磁性橡胶（1）工作面的垂直距离缩短，并导致这些磁敏单元（5）处的磁感应强度增强，从而使得它们的工作电流产生较为显著的变化，通过检测磁敏阵列（3）中每个磁敏单元（5）的工作电流变化情况，即可获取接触位置、接触力的空间分布以及目标物体的局部形状等触觉信息。

本发明所提出的这种柔性触觉传感器具有如下特点：

1) 位于传感器探头外侧的磁性橡胶（1）和弹性夹层（2）均为柔性材料，因此该传感器采用“软接触”工作方式，能有效避免“硬接触”可能导致的被测物体表面以及传感器本身的损伤；

2) 传感器探头接触目标物体时，磁性橡胶（1）和弹性夹层（2）产生自适应目标物体被接触部分表面形状的受压变形，这不仅增大了接触面积，使得接触和抓取过程更加可靠，同时还能够获取更多的力学信息；

3) 传感器探头的结构较为简单，其中磁性橡胶（1）工作面、弹性夹层（2）、磁敏阵列（3）、玻璃衬底（4）的制作工艺相互独立，可分别单独制作完成后再组装成传感器探头，这有利于提高成品率，同时也使得该传感器的加工工艺较为灵活；

4) 传感器探头中的磁敏单元(5)为磁敏二极管或磁敏三极管,与常用的与霍尔元件相比,磁敏二极管和磁敏三极管具有较高的灵敏度,并且其制作工艺与集成电路工艺兼容,因此集成度较高,即磁敏阵列(3)中的磁敏单元(5)密度较高,因而能实现较高的触觉空间分辨率;

5) 与磁敏二极管相比,磁敏三极管具有更高的灵敏度,但制作工艺更加复杂;当对灵敏度的要求不是很高时,可选用磁敏二极管作为磁敏单元(5)以降低工艺制作难度;当要求传感器具有较高的触觉灵敏度时,可选用磁敏三极管作为磁敏单元(5);

6) 当采用磁敏三极管仍然难以达到灵敏度的要求时,在满足一定的触觉空间分辨率的前提下,可将数个相邻的磁敏二极管或磁敏三极管组成一个“复合”磁敏单元(5),再由这些“复合”磁敏单元(5)构成整个磁敏阵列(3),采用这种方法能够检测出非常微弱的磁场变化,具有很高的触觉灵敏度;

7) 在传感器探头的工作面上没有任何电子器件和电极,因而不会出现因接触和抓取目标物体可能导致的电子器件及其线路损坏情况,因此可靠性较好;

8) 磁性橡胶(1)工作面或弹性夹层(2)一旦损伤或失去弹性,可仅对这两部分单独进行拆卸更换,不用更换磁敏阵列(3),因此维护方便,维护成本低廉,但更换磁性橡胶(1)或弹性夹层(2)后需要对传感器重新进行标定;

9) 在传感器探头的设计中,要求磁性橡胶(1)产生的磁力线垂直穿过磁性橡胶(1)平面,这样能够保证磁敏阵列(3)平面与磁性橡胶(1)的磁极相垂直,从而提高传感器的灵敏度;对于磁力线方向与橡胶面垂直的磁性橡胶(1),可以直接将一块完整的磁性橡胶(1)组装在弹性夹层(2)表面;对于磁力线方向与橡胶面平行的磁性橡胶(1),则需要先采用微加工技术将橡胶面分离成多个同样大小的磁性橡胶单元(6),将这些分立的磁性橡胶单元(6)旋转90°后组装成一个新的磁性橡胶单元(6)阵列,再将该阵列安装在弹性夹层(2)表面,其中所有磁性橡胶单元(6)的磁极都正对着磁敏阵列(3);

10) 传感器探头的工作面大小主要取决于磁敏阵列(3)的平面尺寸;磁敏阵列(3)采用微电子技术制作,其尺寸可以很小,也可以较大;小型柔性触觉传感器的结构中必须采用

非常丰富的触觉信息；单个磁敏阵列（3）的最大尺寸取决于硅片的尺寸，在工艺条件许可的前提下可以挑选直径较大的硅片来制作大尺寸的磁敏阵列（3），甚至还可以通过混合集成的方式将数个磁敏阵列（3）组装成一个更大的触觉敏感阵列，再选择相应尺寸的磁性橡胶（1）、弹性夹层（2）和玻璃衬底（4），即可制作出较大尺寸的柔性触觉传感器，可安装在机械臂末端的夹持器表面，用于无损地抓取和传送较大的物体，同时提供力学反馈控制信号，提高抓取的可靠性。

本发明的有益效果是：采用本专利所提出的设计方法，能够制作出一种新型柔性触觉传感器，它具有较高的灵敏度和空间分辨率，其工作面通过柔性变形自适应目标物体的表面形状，能够“软接触”地获取接触位置、接触力的空间分布以及目标物体的局部形状等触觉信息；这种传感器具有不同的规格尺寸，可形成一种系列，以满足不同领域的应用需求；该传感器研制成功后可直接用于机器人技术领域，能安装在机器人手指的指面或机械手夹持器表面，提高抓取和传送等过程的可靠性，也可安装在移动式机器人的身体周围用于避障。

#### 附图说明

图 1 是具有完整磁性橡胶工作面的新型柔性触觉传感器探头结构示意图；

图 2 是工作面由分立磁性橡胶单元组成的新型柔性触觉传感器探头结构示意图；

图 3 是信号处理电路连接示意图。

图中 1.磁性橡胶（磁力线垂直于橡胶平面），2.弹性夹层，3.磁敏阵列，4.玻璃衬底，5.磁敏单元，6.磁性橡胶单元（磁极方向垂直于弹性夹层和磁敏阵列），AMP. 电流放大电路，MUX. 开关选通电路，A/D. A/D 转换电路，D/A. D/A 转换电路，CP. 信号比较电路，MCU. 单片机，RAM. 存储器，DISPLAY. 显示电路，POWER. 电源。

#### 具体实施方式

本发明所提出的柔性触觉传感器由传感器探头和信号处理电路这两部分组成。传感器探头的结构有两种，分别示于图 1 和图 2。这两种传感器探头都主要包括磁性橡胶 1、弹性夹层 2、磁敏阵列 3 和玻璃衬底 4。磁性橡胶 1 位于传感器探头的最外层，它作为工作面直接与被测物体接触。在磁性橡胶 1 工作面上没有任何电子器件和电极，因而不会出现因接触和抓取目标物体可能导致的电子器件及其线路损坏情况，因此可靠性较好。磁性橡胶 1 的下面

是弹性夹层 2，它是磁性橡胶 1 和磁敏阵列 3 之间的缓冲层。磁性橡胶 1 和弹性夹层 2 均为柔性材料，在外力作用下较容易变形，但发生变形时磁性橡胶 1 的厚度并不改变，而弹性夹层 2 在厚度方向上可被压缩，因此弹性夹层 2 为磁性橡胶 1 工作面提供了一个较大的变形空间以自适应被测物体的局部表面形状，这使得传感器能够以“软接触”方式工作，因而能有效避免“硬接触”可能导致的被测物体表面以及传感器本身的损伤。此外由于磁性橡胶 1 和弹性夹层 2 能产生自适应目标物体被接触部分表面形状的受压变形，因而增大了接触面积，使得接触和抓取过程更加可靠，并且还能够在获取更多的力学信息。

在弹性夹层 2 的下面是磁敏阵列 3，阵列中的磁敏单元 5 是采用刚性的硅材料制作而成的磁敏二极管或磁敏三极管，用来检测磁敏阵列 3 表面附近的磁场强度分布。同霍尔元件相比，磁敏二极管和磁敏三极管具有较高的灵敏度，并且其制作工艺与集成电路工艺兼容，因此集成度较高，即磁敏阵列 3 中的磁敏单元 5 密度较高，因而能够实现较高的触觉空间分辨率。

玻璃衬底 4 是一种与硅的热膨胀系数非常接近的硼硅玻璃材料，位于传感器探头的最底层，主要起支撑、隔热、绝缘作用。玻璃衬底 4 通过静电封接技术键合在磁敏阵列 3 的背面，弹性夹层 2 和磁性橡胶 1 则通过微组装技术依次安装在磁敏阵列 3 的正面。磁性橡胶 1 工作面或弹性夹层 2 一旦损伤或失去弹性，可仅对这两部分单独进行拆卸更换，不用更换磁敏阵列 3，因此维护方便，维护成本低廉。

图 3 是信号处理电路连接示意图。信号处理电路主要包括电流放大电路 (AMP)、开关选通电路 (MUX)、A/D 转换电路 (A/D) 和 D/A 转换电路 (D/A)、信号比较电路 (CP)、单片机 (MCU)、存储器 (RAM)、显示电路 (DISPLAY)、电源 (POWER)，各电路之间的结构连接关系是：

传感器探头中的磁敏二极管或磁敏三极管信号输出，连接到信号处理电路中的电流放大电路 (AMP)，信号经该电路放大后输出连接到带有开关选通电路 (MUX) 的 A/D 转换电路 (A/D) 和信号比较电路 (CP)，将放大后的信号转换为数字量，并输出连接到单片机 (MCU)、存储器 (RAM)、显示电路 (DISPLAY)，由单片机 (MCU) 进行处理，完成磁敏单元 5 输出信号的采集和解释，并可通过显示电路 (DISPLAY) 显示、D/A 转换电路 (D/A) 输出连接和存入存储器 (RAM)；

传感器探头磁敏阵列 3 中的每个磁敏单元 5 都通过上述方式连接信号处理电路，各个磁敏单元 5 通过开关选通电路(MUX)进行选择，依次对磁敏阵列 3 中的每个磁敏单元 5 的输出信号进行处理，信号处理电路中的所有电路和元件都通过电源(POWER)供电和导线连接，传感器探头和信号处理电路连接组装在一起。

开关选通电路(MUX)在单片机的控制下依次提取磁敏阵列 3 中每个磁敏单元 5 的输出电流信号，经电流放大电路(AMP)加以放大，再经过 A/D 转换电路(A/D)后将数据存储于存储器(RAM)中，在信号比较电路(CP)和单片机(MCU)的控制下对传感器接触目标物体后的输出信号与接触目标物体前存储于存储器(RAM)中的信号进行比较，并将比较的结果解释成一个完整的触觉信号，再通过 D/A 转换电路(D/A)和显示电路(DISPLAY)显示出触觉信息。

该柔性触觉传感器的研制过程如下：

1) 根据特定应用领域的需求，确定传感器探头的工作面尺寸、空间分辨率和灵敏度，其中传感器探头的工作面尺寸主要取决于磁敏阵列 3 的平面尺寸；

磁敏阵列 3 采用微电子技术制作，其平面尺寸可以很小，但单个磁敏阵列 3 的最大尺寸不超过单个硅片的平面尺寸；

小型柔性触觉传感器探头的结构中必须采用小尺寸的磁敏阵列 3，最小的柔性触觉传感器甚至能够安装在机器人的指面，为机器人提供非常丰富的触觉信息；

对于较大的柔性触觉传感器，在其探头的结构中需要采用大尺寸的磁敏阵列 3，因此在工艺条件许可的前提下可以挑选直径较大的硅片来制作大尺寸的磁敏阵列 3，或者通过混合集成的方式将数个磁敏阵列 3 组装成一个较大的“复合”触觉敏感阵列，由此制作出的大尺寸柔性触觉传感器可安装在机械臂末端的夹持器表面，用于无损地抓取和传送较大的物体，同时提供力学反馈控制信号，提高抓取的可靠性；

2) 根据传感器探头的尺寸要求，确定磁敏阵列 3 的平面尺寸，并结合工艺条件确定单个磁敏阵列 3 的尺寸以及是否需要采用混合集成方式组成一个“复合”磁敏阵列 3；

3) 根据已选定的磁敏阵列 3 的平面尺寸，确定弹性夹层 2、磁性橡胶 1 和玻璃衬底 4

的平面尺寸；

4) 根据空间分辨率的要求确定磁敏单元 5 的最大尺寸，实际制作的磁敏单元 5 可以小于该尺寸以提高空间分辨率；

5) 根据灵敏度的要求确定磁敏单元 5 是采用磁敏二极管还是采用磁敏三极管，与磁敏二极管相比，磁敏三极管具有更高的灵敏度，但制作工艺更加复杂；当对灵敏度的要求不是很高时，可选用磁敏二极管作为磁敏单元 5 以降低工艺制作难度，当要求传感器具有很高的触觉灵敏度时，可选用磁敏三极管作为磁敏单元 5；

当采用磁敏三极管仍然难以达到灵敏度的要求时，在满足一定的触觉空间分辨率的前提下，可将数个相邻的磁敏二极管或磁敏三极管组成一个“复合”磁敏单元 5，再由这些“复合”磁敏单元 5 构成整个磁敏阵列 3，采用这种方法能够检测出非常微弱的磁场变化，具有很高的触觉灵敏度；

6) 根据已选定的磁敏单元 5 的灵敏度，通过理论计算确定弹性夹层 2 的厚度、磁性橡胶 1 的厚度以及磁性橡胶 1 表面附近的最低磁感应强度；

7) 采用有限元分析方法对磁性橡胶 1 和弹性夹层 2 的受力变形以及磁性橡胶 1 变形后的空间磁场的重新分布进行数值计算，进而完成对磁性橡胶 1 和弹性夹层 2 的材料参数和结构参数的优化设计；

8) 采用微电子技术制作磁敏阵列 3，包括版图设计、制版、工艺流水、芯片封装、测试等；

9) 采用静电封接技术将磁敏阵列 3 与玻璃衬底 4 键合在一起；

10) 采用微加工技术制作弹性夹层 2，并将其安装在磁敏阵列 3 表面；

11) 选用质地均匀且具有较大柔性的永磁性橡胶材料，将其加工成所需尺寸要求的磁性橡胶 1 工作面，要求磁性橡胶 1 产生的磁力线方向与工作面的法线方向相一致，这样能够保证磁敏阵列 3 平面与磁性橡胶 1 的磁极相垂直，从而提高传感器的灵敏度；

对于磁力线方向与橡胶面垂直的磁性橡胶 1，可以直接将一块完整的磁性橡胶 1 组装在



弹性夹层 2 表面；对于磁力线方向与橡胶面平行的磁性橡胶 1，需要先采用微加工技术将其分离成多个同样大小的磁性橡胶单元 6，再将这些分立的磁性橡胶单元 6 旋转 90°后均匀地组装在弹性夹层 2 表面，从而形成一个磁性橡胶单元 6 阵列，其中所有磁性橡胶单元 6 的磁极都垂直于磁敏阵列 3；

12) 采用电子线路技术制作信号处理电路，并与传感器探头进行连接调试，其中信号处理电路部分包括电源、A/D 和 D/A 转换电路、开关选通电路、电流放大电路、信号比较电路、单片机、存储器、显示电路；

13) 对传感器进行标定，即通过信号处理电路依次提取和处理磁敏阵列 3 中每个磁敏单元 5 在传感器探头接触已知目标物体前后的输出电流信号，并采用神经网络技术对这些信号进行处理，将其解释成相应的触觉信号。

经过标定的柔性触觉传感器即可用来对未知目标物体进行检测。由于传感器探头最外层磁性橡胶 1 是一种永磁材料，因此在其附近空间存在着一定的磁场分布；位于弹性夹层 2 下面的磁敏阵列 3 对外界磁场较为敏感，阵列中每个磁敏单元 5 的工作电流均会随着磁感应强度的变化而相应改变，因此磁性橡胶 1 产生的磁场影响着每个磁敏单元 5 的工作电流。

当传感器探头未接触任何物体时，磁性橡胶 1 和弹性夹层 2 不会发生任何形变，因此磁性橡胶 1 附近的磁场分布不变，此时磁敏阵列中所有磁敏单元 5 与磁性橡胶 1 面的垂直距离均保持着初始状态的固定值，每个磁敏单元 5 处的磁感应强度不变，它们的工作电流也不变。

当传感器探头与目标物体接触时，磁性橡胶 1 工作面受力向内凹进变形并压缩弹性夹层 2，使得与接触位置相对应的磁敏单元 5 与磁性橡胶 1 工作面的垂直距离缩短，并导致这些磁敏单元 5 处的磁感应强度增强，从而使得它们的工作电流产生较为显著的变化。通过检测磁敏阵列 3 中每个磁敏单元 5 的工作电流变化情况，即可无损地获取接触位置、接触力的空间分布以及目标物体的局部形状等触觉信息，该信息可被用来感知外部环境，或者为更加可靠地抓取和传送目标物体提供触觉信息反馈。

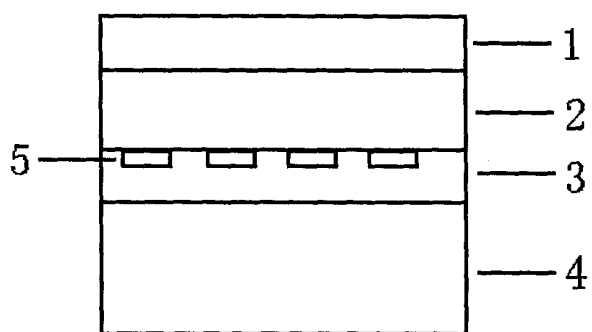


图 1

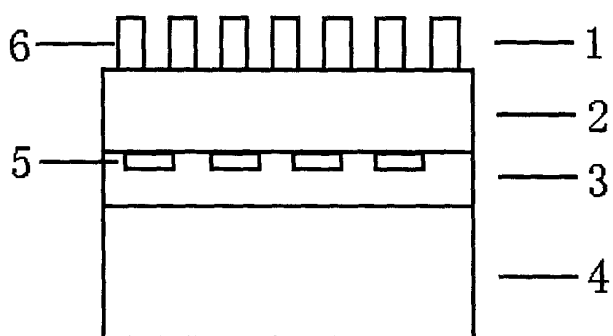


图 2

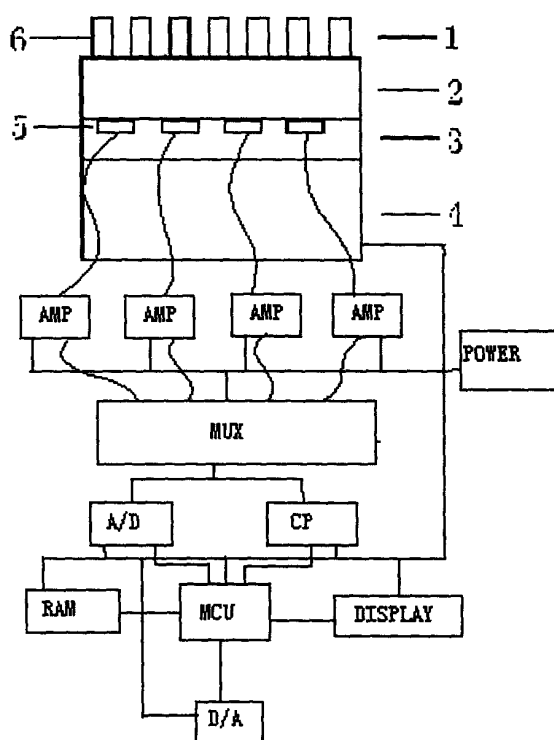


图 3