

-种面向视触融合人机交互的 柔性触觉传感阵列

A Novel Flexible Haptic Sensor Array for Visual Haptic Fusion Human-Machine Interaction

> 王爽/WANG Shuang,吴兵/WU Bing,刘倩/LIU Qian (大连理工大学,中国 大连 116033) (Dalian University of Technology, Dalian 116033, China)

摘要:提出了一种面向视触融合人机交互的三维柔性触觉传感器以及相应的触觉采集软硬件 装置,用于采集真实物理操作过程中的触觉力信息。该触觉传感器由前、左、右3面组成,可佩 戴在人手指尖部位并捕捉抓取过程中的触觉信息。通过实验测量,该传感器的测量范围是0~ 20 N,检测精度为0.1 N,平均响应时间为23.8 ms,能够提供实时、高精度的触觉信息采集。

关键词:柔性触觉传感器;触觉互联网;虚拟现实

Abstract: A flexible 3D haptic sensor and the corresponding signal acquisition software and hardware to collect tactile information during real physical operation are proposed. The tactile sensor consists of the front, left, and right sides, which can be worn at the fingertips of the human hand and capture the tactile information during grasping. Through experimental results, the sensor can range from 0 to 20 N with a detection accuracy of 0.1 N and an average response time of 23.8 ms, which enables to provide real-time and high-precision haptic acquisition.

Keywords: flexible haptic sensor; tactile Internet; virtual reality

DOI:10.12142/ZTETJ.202106006 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20211208.0939.004.html

网络出版日期:2021-12-09 收稿日期:2021-11-10

1 触觉通信的发展

在1948年,美国Arogonne 国家 实验室开发的用于核反应堆操 作的机械式力矩反馈主-从系统开创 了遥操作研究的先河。随后,美国 Utah 大学开发了具有高保真力反馈 的主-从遥操作系统,用以完成多种 海底精细作业任务^[1]。日本港湾空港 技术研究所也研制了水下作业工程 机械力反馈遥操作系统,使水下作业 的效率基本达到了陆地水平^[2]。2010 年,日本庆应义塾大学成功研制了触 觉钳子手术机器人,并通过小鼠肝脏 组织剥离实验证实:该触觉钳子能够 实现在医院的楼宇范围内高性能的 触觉传递,使医生在远离"患者"的位 置也能清晰地感觉到钳子与活体组 织间微弱的触感^[3]。近年来,随着中 国空间站计划、"嫦娥"探月计划、"蛟 龙"深海潜水器等项目的启动实施, 有触觉传递功能的机械臂也正逐渐 获得更密切的关注。可以看出,触觉 通信技术目前在医疗外科、水下勘 探、军事排雷等各个领域的应用不断 增加,这使得人类用户可以在安全距 离执行复杂的甚至是非常危险的 任务^[4]。

随着 5G 通信、云计算和虚拟现 实(VR)等技术的发展,低延迟高可 靠的触觉互联网通信成为可能。触 觉互联网能够提供实时的触觉控制 和远端物理触觉体验,在视触觉融合 的人机交互等领域有广泛的应用前 景。特别是在VR领域,触觉可以作 为目前主流基于视觉VR技术的补 充,给用户带来更加强烈的沉浸感。 这主要体现在与皮肤接触时使用振 动或静电冲击来模拟触感。通过使

基金项目:国家自然科学基金(62071083);中央高校 基本科研业务费基金(DUT21GJ208)

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

用触觉执行器(专门开发的手套、鞋 子、操纵杆等),用户可以从手中或身 体的其他部位获得计算机程序的反 馈。史蒂文•斯皮尔伯格的《Ready Player One》展示了未来 VR 世界,让 用户注意到高质量沉浸式体验不仅 需要视觉,还需要触觉反馈。现在越 来越多的公司开发了面向触觉的设 备,如 Gloveone VR 手套、微软 PIV-OT^[5]等。然而,人类的触觉感知和通 过触觉导向设备进行的触觉演示之 间仍然存在一定差距。在多模态人 机交互应用中,这种差距一般通过触 觉渲染⁶⁰来弥补,而触觉渲染算法的 基础是真实物理操作过程中的触觉 信息。因此,能够提供原始触觉数据 基础的触觉传感器成为实现高保真 视触觉融合人机交互应用的必然 需求。

本文提出了一种新型的柔性分 布式触觉传感器,该传感器采用压阻 式原理,具有多接触面多(底、左、右3 面)、重量轻、体积小等特点。它可以 穿戴于人体的指尖、机械手或机械臂 的末端夹持器上。同时,针对该分布 式柔性触觉传感器,本文提出相应的 信号检测软硬件系统。由于独特的3 面设计,使触觉传感器更适用于采集 人手或灵巧末端夹持机构(例如五指 灵巧机械手)抓取时多姿态、多接触 面的触觉信息,进而能够更准确地为 VR触觉渲染和机械手仿人抓取提供 数据支撑。

2 触觉传感器介绍

Z. KAPPASSOV 将触觉传感器定 义为一种能够获取被接触物体属性 的设备^[7]。触觉传感器按照工作原理 可分为压阻式、压电式、光学式、磁力 式等。其中,压阻式触觉传感器通过 测量敏感材料的电阻值变化来检测 施加力的大小和位置等信息。压阻

式触觉传感器的原理简单、成本低, 因此得到了广泛应用。压阻式触觉 传感器根据敏感材料的不同,又分为 微机电系统(MEMS)应变计类、导电 聚合物类、导电橡胶类和导电溶液 类。MEMS应变计利用的是导体或半 导体在外力作用下产生机械变形时 电阻会发生变化的特性。典型器件 是美国伊利诺伊大学香槟分校利用 聚酰亚胺(PI)作为基底设计的仿生 皮肤。导电聚合物类触觉传感器是 以导电聚合物(例如离子聚合物Flemion导电膜)作为敏感材料的。导电 橡胶类传感器是在有机弹性材料(如 硅橡胶)中添加炭黑、碳纳米管等导 电颗粒制成柔性导电复合材料。典 型器件是美国马里兰大学研发的触 觉传感器,使用混有碳纳米管的聚二 甲基硅氧烷(PDMS)作为敏感材料, 以PDMS作为基底封装。导电溶液类 触觉传感器的典型代表是美国南加 州大学研制的BioTac 触觉仿生手指, 可以直接安装在机械手上^[8]。压阻式 触觉传感器各种类别的优缺点总结 如表1所示。

S. TESHIGAWARA 等设计了一种基于压阻效应的触觉传感器,并利用物体滑动时的频率变化进行滑移检测^[9]。A. SCHMITZ 等设计了一款电容式压力分布传感器,并部署在iCub 仿 人 机 器 人 上^[10]。P. A. SCHMIDT 等设计了一款电容式传感器,能够感知到5 mN的力值变化,但

传感器在抓取过程中容易损坏[11]。 B. CHOI等设计了一种具有微型指尖 触觉传感器的拟人机械手 SKKU-Hand II,其机械手指尖安装了由基于 偏氟乙烯(PVDF)和压变电阻组成的 触觉传感器,能够感知机械手抓取过 程中的力变化^[12]。BioTac是SynTouch 公司开发的一款能够感知压力、温度 和振动信息的触觉传感器.3种触觉 信息通过3组独立的传感器实现,然 后集成到一起。M. K. JOHNSON等 设计一款能够显示物体表面几何信 息的触觉传感器 GelSight, 主体由凝 胶和相机构成[13],传感器表面是一块 涂有反光材料的透明弹性体膜。当 物体接触到传感器时,弹性体发生变 形。通过相机捕捉弹性体的变形信 息,即可重建出接触物体的表面信 息。S. SUNDARAM等设计了一款由 压阻膜组成的可伸缩触觉手套,每个 触觉手套上含有548个触觉传感器。 通过触觉手套可以识别单个物体、估 计其重量,还可以探索抓取物体过程 中的典型触觉模式[14]。

3 触觉传感阵列设计与触觉信 号检测套件

3.1 传感器设计与制作

传感器采用双面布线的方式,一 共分为5层,整体结构如图1所示:第 1层为柔性非导电材料层,使用聚对 苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜;第2

▼表1 不同压阻式传感器优缺点

种类	柔性基底+敏感材料举例	优点	缺点
MEMS应变计	 PI+金属应变计 PI+NiCr PDMS+应变片 	・灵敏度高 ・空间分辨率高	 ・単元易碎 ・成本较高 ・封装后尺寸大
导电聚合物	PDMS+Flemion	• 弯曲性好 • 成本低	灵敏度低
导电橡胶	 PDMS+混有CNT的PDMS PDMS+INASTROMER导电橡胶 	• 弯曲性好 • 可检测静态动力	存在迟滞现象
导电溶液	柔性橡胶+导电液(BioTac)	・集成度高 ・穏定性好	・信号串扰 ・密封性要求高

CNT:碳纳米管 MEMS:微机电系统 PDMS:聚二甲基硅氧烷 PI:聚酰亚胺



▲图1 传感器布线与结构图

层为电极层,采用喷墨打印的方式将 导电银浆在第1层上印刷4行导线和 28个圆形电极;中间层(第3层)是力 敏材料层,可将石墨烯力敏油墨印刷 于圆形电极处;第4层为对称电极层, 也采用喷墨打印的方式将导电银浆 在PET层上印刷7列导线和28个圆 形电极;第5层也是柔性非导电材料 PET聚酯薄膜,第4层的导电银浆也 印刷在其上。第2层和第4层可以互 换。因此,传感器有4行7列,共有28 个传感单元、11条输出导线。其中, 11条导线分别代表4行和7列,用来 定位每个感应点。

为了更好地贴合机械手,传感器 表面设有引导线,可按引导线进行弯 折。另外,考虑弯折处应力产生的测 量误差,我们需要在弯折引导线附近 对基材进行镂空设计。这时信号采 集的电极线向远离弯折线的方向 避让。

触觉传感器的制作过程共分为3 步:第1步是在150°下预缩PET聚酯 薄膜,并将它作为双面基底,厚度为 50 um; 第2步是在上层基底喷墨印刷 7列导电银浆布置电路,厚度为5um, 下层基底喷墨印刷4行导电银浆布置 电路,厚度为5um;第3步是在两层银 导线中间喷墨印刷石墨烯力敏油墨, 厚度为20 um。整个传感器一共有4 行7列,共28个单元,左边第2列和第 3列以及右边第2列和第3列中间有 引导线(可弯折形成3面结构)。这4 列传感单元圆心距为8mm,其他列传 感单元圆心距为7mm。传感器成品 整体长 58 mm, 列宽 32 mm, 厚度为 130 um.

3.2 触觉信号采集

传感阵列的等效电阻如图2所

示,触觉信号的采集通过循环扫描电路实现,并利用零电位法(红色小电阻)来消除环路干扰(原理如图3所示)。当硬件实现时,7条列导线用单片机循环选通,并通过模数转换器(ADC)采集4条行导线的输出电压。假设位于第*i*行、第*j*列的传感单元受压力,则力敏电阻值*r_{ij}*发生变化。由式(1)可知,输出电压*V_{out}*的值将发生变化;受到的压力越大,输出电压值越大。

$$V_{\rm out} = V_{\rm dd}^* \left(\frac{-r_{\rm i,j}}{R_{\rm ref}}\right) , \qquad (1)$$

其中, V_{dd} 表示电源输入电压, R_{ref} 表示 参考电阻。因此,通过循环扫描开关 阵列1(Switch₁)的第*i*行和开关阵列2 (Switch₂)的第*j*列,测量输出电压值, 即可获得触觉传感器28个传感单元 的受压力大小。

触觉信号的具体采集流程如图4 所示。首先我们初始化7个通用型输 入输出(GPIO)引脚口,用于选通并拉 高电压;然后定义4路ADC采集通 道,用于将模拟信号转换为单片机可 以处理的数字信号;最后初始化通用



王爽 等



异步收发器(UART)模块,用于将单 片机采集回的数据上传给上位机。 初始化完成后,待上位机发送指令, 触觉信号采集软硬件设备开始采集 触觉信号。首先,GPIO选通某一列, 然后激活 ADC,从而对四行电压进行 采样。如此循环7次,得到28个电压 采样值,再通过图5所示的测力计进 行标定。

4 有限元仿真

当传感器受力时,中间的力敏材 料层产生微小位移,阻值发生改变。 通过测量电阻值的变化量可求出每 个传感单元上方的一维力大小,通过 获取多个单元的电阻变化就可以计 算出整个传感器的三维合力大小。

传感器为集成在机器人指端的 触觉传感器。通过将传感器贴附在 机器人指端,我们可以获取指端接触 物体时的触觉信息。传感器三维模 型与尺寸如图6所示,每个传感单元 可等效为直径3 mm、厚30 um 的圆 柱。传感器主要由PET聚酯薄膜、导 电银浆和石墨烯力敏油墨组成,贴附 在指端基体上。为简化仿真实验,我 们将导电银浆和石墨烯力敏油墨合 并成一层。

我们使用有限元分析软件对传 感器进行仿真实验,分析每个传感单 元受法向载荷和切向载荷作用时对 应的应力分布情况。图7展示了不同 情况下的指端与接触面的相对表现 和受力分析。

综上所示,本项目设计的触觉传 感器切实可行,具有触觉压力场和滑 移剪切力场三维的精确感知能力。

5 实验结果及参数指标

我们使用如图5所示的测力计作 为标准压力信号值,从而将力信号的 大小与传感器测量的电压信号—— 对应。实验结果如图8中的绿点所 示。为了对力与电压的关系进行建 模,我们对测试数据进行曲线拟合, 具体如图8中的蓝线所示。力与电压 的关系为: $f(x) = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 +$





▲图6 传感器的三维模型、尺寸以及传感单元构成

 p_3 ·x + p_4 。其中, p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 分别 等于 4.121、-4.129、8.506、-0.8206。 如图8所示,当压力处于20N以下 时,力与电压的关系是非线性关系, 可以认为此区间为传感单元非线性 受力区间。从图8可以看出,该传感 器在0~20N具有较高的灵敏度。当 测力计以0.1N稳定施加时,传感器 有稳定的反馈,即所提出的触觉传感 器测量精度为0.1 N。触觉传感器的 另一个关键性能参数是响应时间,它 表示测力计开始向传感器单元提供 压力与计算机打印出电压信号的时 间差。响应时间即响应延迟,由周期 延迟(由DSP扫描过程引起)和输出 延迟(由计算机引起)组成。由于提 出的触觉传感器阵列包含4×7个传 感器单元,因此ADC每次读取4行, 循环7次则可以完成一个周期的采 集。其中,一次循环延迟≈ADC采集 延迟+电压稳定延迟,周期延迟≈ (ADC采集4行信号的采集延迟+电 压稳定延迟)×7(列),多次测量获得 平均响应时间为23.8 ms。

图9展示了传感器在不同受力情况下的触觉热力图。可以看出,在传感器底部均匀受力情况下,每一列上的压力大致相同;在传感器底部受力不均匀情况下,从左到右各列压力值依次减小。图10展示了传感器在物体表面滑动时的实时受力情况。在传感器上固定了一个橡皮擦,然后拖动它滑过在桌面上固定好的牙签。可以看出,本文提出的传感器准确地感知了整个过程中力的变化。

6 结束语

本文中,我们提出了一种基于压 阻原理的三维柔性触觉传感器阵列。 该传感器通过测量所有单元的电阻 变化来确定整个三维阵列的力。该 传感器的关键性能参数在0~20N的





▲图8 力-电压拟合图



一种面向视触融合人机交互的柔性触觉传感阵列 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL 王爽 等



▲图10 对微小触觉信号的实时、准确感知

测量范围内,检测精度为0.1 N,平均 响应时间为23.8 ms。该传感器可为 多模式人机交互应用中的触觉算法 提供数据基础,对仿人机器人抓取也 有一定的指导意义。

参考文献

- JACOBSEN S. Design of a multiple degree of freedom, force reflective hand master/slave with a high mobility wrist [EB/OL]. [2021–11– 04]. https://scholarsarchive. byu. edu/facpub/ 2108/
- [2] HIRABAYASHI T, AKIZONO J, YAMOMOTO T, et al. Teleoperation of construction machines with haptic information for underwater applications [J]. Automation in construction, 2006, 15(5): 563–570
- [3] MOTOOKA W, NOZAKI T, MIZOGUCHI T, et al. Development of 16–DOF telesurgical for ceps master/slave robot with haptics [C]// IECON 2010 – 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2010: 2081–2086. DOI: 10.1109/ IECON.2010.5675353
- [4] XU X, SINGH H, LIU Q, et al. A novel energy compensation scheme for quality enhance ment in time-delayed teleoperation with multi-DoF haptic data reduction and communication [J]. IEEE transactions on haptics, 3379(99): 1 DOI: 10.1109/TOH.2021.3103379
- [5] KOVACS R, OFEK E, GONZALEZ FRANCO

M, et al. Haptic PIVOT: on-demand hand helds in VR [C]//Proceedings of the 33rd An nual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, 2020: 1046– 1059. DOI: 10.1145/3379337.3415854

- [6] ZHOU R G, WANG D X, ZHANG Y R. Haptic rendering of tissue boundary for surgical training [C]//2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mecha tronics. IEEE, 2008: 949–954. DOI: 10.1109/ AIM.2008.4601789
- [7] KAPPASSOV Z, CORRALES J A, PER -DEREAU V. Tactile sensing in dexterous robot hands-review [J]. Robotics and autono mous systems, 2015, 74: 195–220. DOI: 10.1016/j.robot.2015.07.015
- [8] WETTELS N, SANTOS V J, JOHANSSON R S, et al. Biomimetic tactile sensor array [J]. Advanced robotics, 2008, 22(8): 829–849. DOI: 10.1163/156855308X314533
- [9] TESHIGAWARA S, TSUTSUMI T, SUZUKI Y, et al. High speed and high sensitivity slip sensor for dexterous grasping [J]. Journal of robotics and mechatronics, 2012, 24(2): 298– 310. DOI:10.20965/jrm.2012.p0298
- [10] SCHMITZ A, MAIOLINO P, MAGGIALI M, et al. Methods and technologies for the implementation of large-scale robot tactile sensors [J]. IEEE transactions on robotics, 2011, 27(3): 389–400. DOI:10.1109/TRO.2011.2132930
- [11] SCHMIDT P A, MAËL E, WÜRTZ R P. A sensor for dynamic tactile information with applications in human-robot interaction and object exploration [J]. Robotics and autono mous systems, 2006, 54(12): 1005–1014. DOI: 10.1016/j.robot.2006.05.013
- [12] CHOI B, LEE S, CHOI H R, et al. Develop ment of anthropomorphic robot hand with

tactile sensor: SKKU hand II [C]//2006 IEEE/ RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2006: 3779– 3784. DOI: 10.1109/IROS.2006.281763

- [13] JOHNSON M K, COLE F, RAJ A, et al. Microgeometry capture using an elastomeric sensor [J]. ACM transactions on graphics, 2011, 30 (4): 1–8. DOI: 10.1145/2010324.1964941
- [14] SUNDARAM S, KELLNHOFER P, LI Y Z, et al. Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove [J]. Nature, 2019, 569(7758): 698–702. DOI: 10.1038/s41586–019–1234–z



专题