

压电式触觉反馈执行器发展综述

邢继春, 刘德春, 任文迪

(燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066000)

摘要:该文介绍了压电式触觉反馈执行器的基本原理及开展研究的理论基础。根据触觉反馈执行模块的表面结构和压电材料对压电式触觉反馈执行器进行了分类,并介绍了其特点及国内外相关研究成果。根据两种分类方式对压电式触觉反馈设备进行了交叉比较,分析了各类压电触觉设备的应用范围,并以此为基础阐述了压电触觉未来的发展趋势及研究方向。

关键词:压电材料;触觉反馈执行器;研究现状;分类方法

中图分类号:TN384;TP242.6+1

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.032

Review of Development of Piezoelectric Tactile Feedback Actuator

XING Jichun, LIU Dechun, REN Wendi

(School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: This paper introduces the basic principle of piezoelectric tactile feedback actuator and the theoretical basis for its development. The piezoelectric tactile feedback actuators are classified according to the surface structure of the tactile feedback executive module and piezoelectric materials, and their characteristics and related research results at home and abroad are introduced. The cross comparison between the piezoelectric tactile feedback devices is carried out according to the two classification methods. The applications of various piezoelectric tactile devices are analyzed. On the basis of this, the development trends and research directions of piezoelectric tactile in the future are discussed.

Key words: piezoelectric material; tactile feedback actuator; research status; classification method

0 引言

随着人机交互技术的不断发展,对触觉模拟技术的研究也日渐深入。出现了电磁式、压电式、气动式及电刺激式等多种激发方式的触觉反馈执行器^[1-3]。其中利用压电材料作为致动元器件实现触觉再现的触觉反馈装置^[4],具有响应速度快,驱动频带宽,振动强度大,振动体验感觉细腻真实,声学噪声小,功耗低等优点^[5]。

目前多种类型的压电式触觉执行器在虚拟现实手套、虚拟医疗、内窥诊疗、触觉显示屏等领域都有成功的应用^[6]。但对于压电式触觉反馈设备的分类尚无标准统一的分类方法,因此,本文作者根据压电式触觉反馈设备的研究现状总结出几种分类方式^[7-8]。由于压电式触觉反馈执行器是通过激振触觉反馈执行模块产生不同振型来实现触觉功能,按

触觉反馈执行模块的表面结构特征及激振材料来分类能较直观地反映出压电式触觉反馈执行器的工作特点及实现原理,所以,本文按触觉执行模块表面结构特征及激振压电材料进行分类。本文介绍了支持压电式触觉反馈执行器设计的理论基础,总结了压电式触觉反馈执行器的两种分类方法和相应的研究现状,并以此为基础阐述了压电触觉未来的发展趋势及研究方向,为压电触觉的研究和应用提供一定的理论借鉴。

1 压电式触觉反馈执行器理论基础

压电式触摸反馈设备通常利用压电材料的机电耦合特性,在触觉执行模块上布置压电材料,当在压电材料上施加稳态激励信号时,可激发触觉执行模块发生振动,通过调节触觉执行模块的不同振动频率得到不同的触觉反馈^[9]。表1为压电式触觉反馈

收稿日期:2017-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605423);河北省高等学校科学研究项目(QN2018154)

作者简介:邢继春(1981-),男,辽宁营口人,副教授,硕士生导师,博士,主要从事压电驱动与控制,触觉反馈技术的研究。

执行器的几种分类方式。

表1 常见压电式触觉反馈执行器的分类方式

分类方法	类型
触觉反馈执行模块表面结构特征	薄膜型、平面型、触点型、空间型
激振压电材料	无机压电材料、有机压电材料、复合压电材料
触觉再现理论基础	空气压膜、国标轮廓线、振动型态
振型刺激力方向	纵向型、切向型、多向型
对触觉反馈执行模块的激振方式	共振式、非共振式
压电材料布置方式	阵列式、集中式、一体式

不同的研究者在压电式触觉反馈系统工作机理理论上存在差异。目前较常见的理论基础有空气压膜效应、表面粗糙度评定准则和触觉平面振型参数设计3种。其中, Wiesendanger 最早提出了空气压膜效应^[10]。空气压膜效应是指两个相对平板在互相作用并产生振动时, 由于空气分子之间存在粘滞力, 气体分子无法立即从两个平板之间的侧面释放, 从而在两个平板之间产生一个微小高度的空气薄膜即为压膜, 通过调节振动的频率即可调控空气压膜对平板之间摩擦系数的影响^[11]。表面粗糙度评定准则即为新国标 GB/T3505—2000 所规定的粗糙度评定准则, 对被测表面的轮廓建立一元线性回归方程, 然后计算轮廓算术平均偏差 R_a , 即

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (1)$$

在国标粗糙度评定准则 GB/T3505—2000 规定取样长度 l_r 内, 纵坐标值 $|Z(x)|$ 的算术平均值即为轮廓算术平均偏差。通过调节振动参数及表面结构, 可改变触觉表面的粗糙度^[12]。振型参数设计方法是利用所设计的触觉平面振动频率和波长, 计算皮肤在移动过程中的相对振动频率、振幅和法向压力等参数, 再以皮肤受体感知原理为基础试验, 并分析各个参数对触觉平面粗糙度的影响^[13]。触摸频率为

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (2)$$

式中: v 为触摸速度; λ 为振型波长。

2 触觉反馈执行模块表面结构特征

2.1 薄膜型

薄膜型压电式触觉反馈执行器通常是将压电薄

膜附着在触觉平面上, 激发压电薄膜振动后即可使绝缘材料发生振动, 从而刺激手指产生不同的触觉感受。2006年, YUJI 设计了一种以聚偏氟乙烯 (PVDF) 压电薄膜为基础的触觉传感器 (见图1)^[14], 将传感器与人体手指皮肤感受器互相比并进行了相关的实验, 该触觉反馈设备由压电薄膜、导电薄膜、绝缘薄膜、铜片及特殊海绵构成。压电薄膜被导电薄膜包裹, 下方设置特殊海绵为触觉平面提供缓冲, 上方粘贴绝缘材料作为与手指的接触平面。PVDF 压电薄膜在 10 kHz 振动频率下的电容值为 103 pF, 在特殊海绵的共同作用下, 其可以产生 5~10 kHz 的振动, 且可在 20 N 以内的压力下产生明显的电压变化反馈; 同时, 在 10~50 °C 改变接触物体的温度也可产生明显的电压变化, 可对压力及温度进行一定程度的触觉感知。

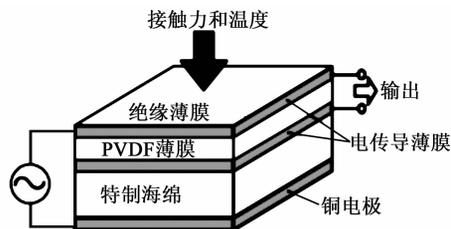


图1 PVDF压电薄膜触觉反馈执行模块结构

2005年, Akio 等设计了一种具有远程监控功能的压电式触觉反馈系统 (见图2), 该系统由触觉检测模块、数字信号处理 (DSP) 及触觉显示模块3部分组成。触觉检测模块为U型海绵底端粘贴压电薄膜, 经过力传感器及氯乙炔单体 (VCM) 致动器转换为电信号后传递给 DSP 模块, 再将处理后的信号传递给触觉显示模块, 手指指端套有导电材料并与触觉薄膜接触产生振动, 从而完成远程触觉传递及再现^[15]。由于薄膜型触觉平面压电性能好, 振动平面较柔软, 摩擦系数小及易产生局部变形^[16], 因此, 薄膜式压电触觉反馈常被应用在触觉传感器及触觉远程传递等领域。

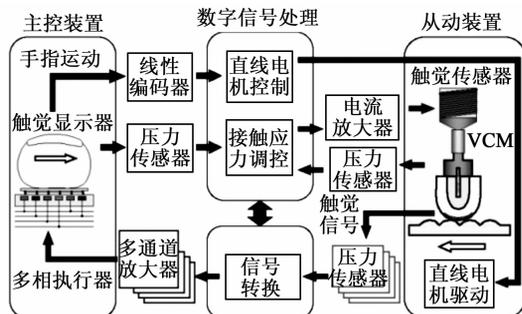


图2 具有远程监控功能的压电式触觉反馈系统

2.2 平面型

平面型压电式触觉反馈执行器是质地较光滑、坚硬的触觉反馈平面结构,一般将压电晶体或压电陶瓷与触觉平面紧密连接,然后激发压电片与触觉平面发生振动,从而控制触觉平面的振动频率,实现对触觉反馈的模拟及调控,触觉平面多采用具有一定刚度的塑料或金属板构成。2002年,Yasushi等用压电片及管脚阵列的方式设计了一种纹理再现触觉反馈设备(见图3)^[17],此设备用压电片激发振动的针阵列与触觉平面连接作为皮肤触感激励,触针按照 5×2 进行阵列分布,每根触针由250 Hz的激励信号分别进行激励,最大振幅是 $22 \mu\text{m}$ 。该设备通过使用阵列式触针对人的手指进行触觉刺激,从而通过实行触觉质地渲染来产生不同触觉反馈。实验证明了通过触觉和力共同刺激实现的纹理质地的显示比单纯的力刺激实现的触觉显现更精确和快速。

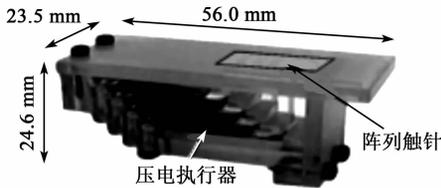


图 3 振动管脚阵列单元

马露等设计的一种基于摩擦力控制的触觉再现系统是通过控制手指在触觉平面上不同位置的振动频率来实现触觉形状再现^[18]。如图4所示,设备由3个压电陶瓷激振亚克力触觉平面,通过线性传感器阵列来检测手指位置,将触觉平面一分为二,通过改变不同位置的振动频率来实现触觉平面上的形状再现。平面型触觉反馈执行器触觉再现精度较高,性能稳定,但触觉反馈特性单一,可以实现的触觉感受有限^[19]。

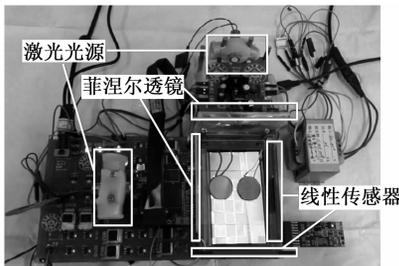
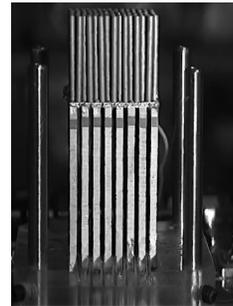


图 4 触觉再现系统

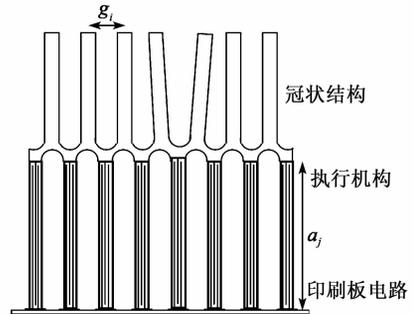
2.3 触点型

触点型压电式触觉反馈执行器通常采用阵列式的触点或触针、类睫状体结构,该结构不仅产生触点

纵向振动触感,还会产生一定的横向拉伸刺激^[20]。图5为加拿大麦克吉尔大学智能机电工程与中心研发的一种基于压电横向皮肤拉伸原理的触觉反馈装置^[21]。该设备有64个压电激振器,112个触针及36个沟槽,64个压电激振器通过64个光学开关独立编址,它们以列为单位被8个电压放大器驱动。当手指在触针上移动时,触针会通过光学开关及相应的程序产生横向力给予皮肤横向拉伸,故该触觉反馈执行器可以实现线、面、形状及几何边界触感。



(a) 实物图



(b) 原理图

图 5 基于压电横向皮肤拉伸原理的触觉反馈装置

运用触点式触摸结构的横向拉伸特性,邢继春等设计了一种基于共振原理的压电式触觉反馈执行器(见图6)。3个以上的触摸梁固定在支架上,触摸梁上为类睫状体结构,每个触摸梁上的类睫状体密度不等,压电陶瓷片粘贴在触摸梁上、下表面,控制器输出高于20 kHz的正弦信号,在压电陶瓷片激

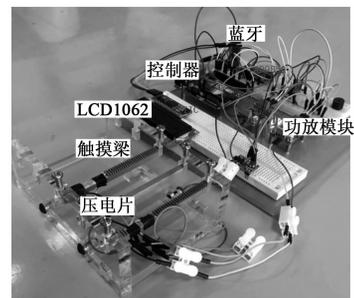


图 6 类睫状体压电触觉反馈装置

振下类睫状体式触摸梁发生弯曲振动,由于压电陶瓷片及睫状体位置布置的特殊性,会使类睫状体结构趋于向其中一个方向振动,睫状体触点对手指不同方向的横向拉伸使手指产生2种方向上不同粗糙度的触觉感受。

触点型触觉平面结构因可对人的皮肤产生横向激励,故产生的触觉反馈特性复杂^[22]。但触点的存在会对模拟触觉产生较大的干涉,影响触觉反馈效果。

2.4 空间型

近年来还出现了一种运用压电驱动器在触觉平面上发射超声波刺激人皮肤产生空间触觉的压电触觉反馈装置。2015年,东京大学的Takayuki Hoshi等在世界触摸技术大会上发表了一种空间超声波触觉显示设备(见图7),该设备通过向一个半封闭空间内的不同位置发射超声波来刺激人的手部皮肤,从而实现空间触觉再现^[23]。但该设备由于是超声波产生微弱振动来刺激人的手部皮肤,存在触觉效果较微弱,且整体设备较庞大,阵列式超声波发生压电结构较复杂等缺点。设备还处于开发初期阶段,有一些技术问题需要解决。

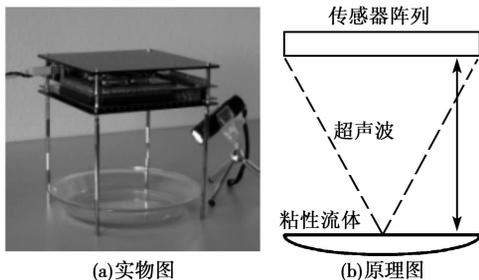


图7 空间超声波触觉显示模块

3 激振模块的压电材料

3.1 无机压电材料

无机压电材料分为压电晶体和压电陶瓷两种,压电晶体一般指压电单晶体,压电陶瓷则泛指压电多晶体。相较而言,压电陶瓷压电性更强,介电常数高,易于加工成任意形状且价格低,但机械品质因数较低,稳定性较差,故不适用于高频工作环境^[24]。王秀荣等研究了一种压电驱动器的触觉显示器(见图8),两个压电双晶陶瓷片的上、下表面施加稳态正弦激励电压 $u = A\sin(\omega t + T)$, 激发整个装置共振^[25]。调节正弦激励电压的峰值和频率,激发出不同的振动模式以得到不同的振动响应。振子片通过不同的形式布置在整个装置的顶端,一般采取平行

式和正交式,振子片受到中部压电双晶片的激励振动,从而产生不同模式的触感。使用压电陶瓷激励触觉反馈设备时一般将压电陶瓷与触觉平面紧密固定,结构简单且易制成各种形状,压电性能好,一定程度上弥补了稳定性上的不足,是压电式触觉反馈执行器的常用压电材料。

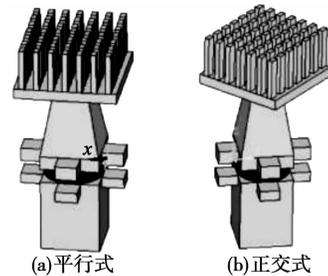


图8 压电双晶陶瓷片触觉反馈执行器

3.2 有机压电材料

有机压电材料又称压电聚合物,较常见的PVDF、氟化聚乙烯(PVF₂)等是薄膜型触觉反馈平面结构的常用压电材料。有机压电材料具有材质柔软、低密度、低阻抗、耐腐蚀及高压电电压常数等优点^[26-27],但因材质柔软易变形,故常用于触觉传感器及触觉远程监控设备,且通常用其他导电材料包裹。2005年,Masashi等研发了一种用于表示虚拟触摸的多频振动的触觉合成方法,并通过此方法设计了一种可穿戴式触觉设备^[28]。该设备所用的是一种离子导电聚合物凝胶膜(ICPF),其概念基于两方面:

1) 根据不同的皮肤触觉受体类型来选择不同的频率范围。

2) 根据手的移动而响应的刺激进行时间控制。

图9的睫状体设有ICPF驱动器,所有纤毛都倾斜45°来传递机械刺激,并正向和切向地作用在皮肤的有效表面上。手的采样率通过快速远程接入站(FASTRAK)的位置可以确定为100 Hz,通过采样率、手的运动速度和平滑分化的加速度计算,可以确定ICPF驱动器的输入波形频率为10 kHz。由于

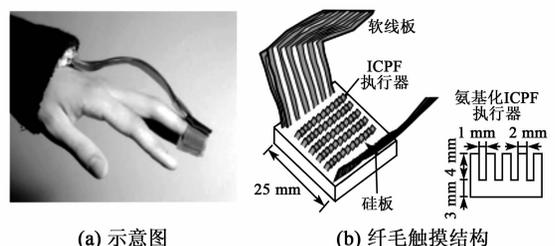


图9 离子聚合物触觉反馈执行器

ICPF 的离子导电特性,该设备需要在潮湿环境下工作。

3.3 复合压电材料

复合高分子压电材料通常由高分子基体与压电体粉末复合。其中高分子基体可以是各种物理和化学性能优异的普通高分子材料,也可以是具有压电特性的特殊高分子。高分子基体和无机压电材料复合后,其压电性能和介电常数均有提高,还提高了材料的压电稳定性^[29]。2015年,Khan等研究了一种以聚偏氟乙烯-三氟乙烯复合材料为基础设计的触觉反馈屏幕^[30],如图10所示。在导电板上设置顶部电极和底部电极各4个,每个电机都与 4×4 的复合压电材料触觉块相连,每个触觉块的有效工作空间为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,每个触觉模块之间通过宽度为 $100 \mu\text{m}$ 的互联线相接,手指在其平面上移动时即可感知温度、压力等参数,由于复合材料的柔性特征,整个触觉平面可以进行弯曲。复合型压电材料各项性能都得到了显著提高,耐冲击不易受损,故在水声、电声、超声及超声换能器领域已得到较广泛的应用^[31],触觉设备上应用尚少。

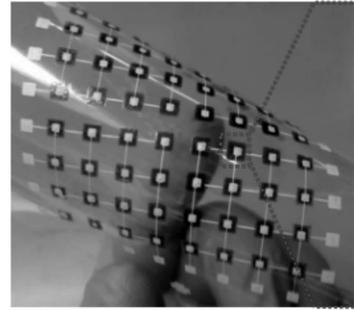


图10 复合材料触觉反馈结构

4 类型比较及发展趋势

4.1 交叉式结构和材料类型比较

各类压电式触觉反馈执行器的交叉式性能比较如表2所示。无机压电材料一般用于平面型及触点型具有一定硬度的触觉平面;薄膜型多使用材质较柔软的有机压电材料和复合压电材料;有机压电材料多用于触觉传感器,也可用于触点型触觉结构;触点型的触觉结构可以产生横向拉伸,实现更丰富的触觉反馈;复合压电材料压电性能好,耐冲击,材质柔软,可以弯折,常用于水声及柔性触觉反馈平面。

表2 结构和材料类型比较

结构	无机压电材料	有机压电材料	复合压电材料
薄膜型		柔软,易变形,响应快,多用于触觉传感。	柔软,压电性能好,耐冲击,多用于水声。
平面型	结构简单,振动明显,适用于形状再现。		常见 PVDF-PZT 复合材料,压电性能比 PZT 更好。
触点型	产生横向拉伸,造价便宜,易加工。	须在潮湿环境下,振动柔和,响应快,受干扰小。	
空间型	阵列压电陶瓷超声波激振器,产生空间触觉。		

4.2 压电式触觉执行器发展趋势

目前市面上的虚拟现实产品着重实现对人视觉及听觉的模拟再现,对触觉的模拟还处于较初级的阶段^[32]。Manus VR公司开发的Manus VR手套具有精美外观与精密电子仪器相结合的特点,可以较精准地模拟虚拟环境的触觉感受。2013年,德州仪器(TI)宣布面向高清消费类、汽车及工业触摸屏应用推出业界最高集成度压电式触觉驱动器,用户可体验到吉他琴弦拨动、翻页感、键盘或机械按钮按下以及大量的游戏效果,实现逼真高清触摸屏体验^[33]。

结合国内外对压电触觉的研究成果,作者认为以下几点将成为压电触觉设备未来的发展趋势:

- 1) 更精确地再现触觉感受,提升触觉反馈的多样性。
- 2) 目前的压电式触觉反馈设备只能实现基本的粗糙度模拟,增加对人体皮肤压力的触觉模拟成为待解决的问题。
- 3) 实现同一触觉平面、不同方向上的触觉差异,使触觉反馈具有方向性。
- 4) 简化压电触觉设备的结构,降低成本,使试验样机成为普及产品是未来科技人员亟待解决的

问题。

5 结 束 语

压电触觉反馈执行器是触觉设备重要分支之一。目前,压电式触觉反馈执行器主要实现平面上的触觉模拟,对触觉压力和触觉方向性的研究还处于初期的阶段。压电触觉反馈设备在医疗、军事、航天、娱乐等领域的应用技术都有很大的发展空间,触觉反馈设备的很多触觉功能还有待探索和研究,在世界范围内对压电式触觉设备的关注和研发力度还会进一步提升。

参 考 文 献:

- [1] 张燕燕,李朝东,匡伯谦. 触觉显示器及其振动激发方式[J]. 工业仪表与自动化装置,2008(2):82-85.
ZHANG Yanyan, LI Chaodong, KUANG Boqian. Tactile displays actuators and their vibroexcitation mode[J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2008 (2): 82-85.
- [2] 刘京诚,刘俊,李敏. 基于压电式新型三维力传感器的设计[J]. 压电与声光,2005,27(6):643-645.
LIU Jingcheng, LIU Jun, LI Min. Design of a new type of three-dimensional force sensor based on piezoelectric [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27 (6): 643-645.
- [3] 辛毅,杨庆雨,郑浩田,等. PVDF 触滑觉传感器结构及其调理电路设计[J]. 压电与声光,2014,36(1):76-78.
XIN Yi, YANG Qingyu, ZHENG Haotian, et al. PVDF structure of touch slip sensor and design of its conditioning circuit[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2014,36(1): 76-78.
- [4] 辛毅,田红英,蒋琪,等. 基于 LabVIEW 的 PVDF 压电薄膜触滑觉识别系统[J]. 压电与声光,2015,37(5):793-795.
XIN Yi, TIAN Hongying, JIANG Qi, et al. PVDF based sliding contact recognition system for piezoelectric thin film based on LabVIEW[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2015,37(5): 793-795.
- [5] 田中哲郎. 压电陶瓷材料[M]. 陈俊彦,译. 北京:科学出版社,1982:7-12.
- [6] 付志宇. 力触觉反馈系统的虚拟现实应用研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2014:2-5.
- [7] CHEE C. A review on the modeling of piezoelectric sensors and actuators incorporated in intelligent structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures,1998,9(1):3-19.
- [8] 陈卫东,董艳茹,陈颖. 一种新型触滑觉传感器的试验研究[J]. 压电与声光,2010,32(4):571-573.
CHEN Weidong, DONG Yanru, CHEN Ying. Experimental study of a new type of touch slip sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2010,32(4): 571-573.
- [9] 王林. 基于 PVDF 的压电触摸屏的研究[D]. 北京:清华大学,2012:4-6.
- [10] WIESENDANGER M, PROBST U, SIEGWART R. Squeeze film air bearings using piezoelectric bending elements[C]//Switzerland: EPFL,2001.
- [11] 李沅泽. 基于双向摩擦力控制的触觉再现系统[D]. 南京:南京航空航天大学,2016:10-12.
- [12] 隋文涛. 新国标表面粗糙度参数的评定程序[J]. 工具技术,2006,40(12):79-81.
SUI Wentao. New GB program for evaluating surface roughness parameters[J]. Tool Engineering, 2006, 40 (12): 79-81.
- [13] KAJIMOTO. Pervasive haptics[M]. Tokyo: Springer Japan,2016:98-110.
- [14] YUJI J I, SONODA C. A PVDF tactile sensor for static contact force and contact temperature[C]//Daegu: Sensors, 2006 IEEE Conference on IEEE, 2006: 738-741.
- [15] YAMOMOTO A, KIM K Y, HIGUCHI T. Tactile telepresence system using PVDF sensors and electrostatic stimulator[C]//Portugal: Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2012:1766-1771.
- [16] 赵冬斌,张文增,都东,等. 机器人用 PVDF 触觉传感器的国外研究现状[J]. 压电与声光,2001,23(6):428-432.
ZHAO Dongbin, ZHANG Wenzeng, DU Dong, et al. Foreign research status of robot using PVDF tactile sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 23 (6): 428-432.
- [17] IKEI Y, SHIRATON M. Texture explorer: A tactile and force display for virtual textures [C]//Orlando: Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems,2002,Haptics 2002 Proceedings. Symposium on IEEE,2002:327-334.
- [18] 马露,陆熊. 基于摩擦力控制的触觉再现系统研究[J]. 计算机技术与发展,2015(1):62-65.
MA Lu, LU Xiong. Research on haptic reproduction system based on friction control[J]. Computer Technology and Development,2015(1): 62-65.

- [19] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程,1998,6(5):26-32.
ZHANG Tao,SUN Lining,CAI Hegao. Study on the basic characteristics of piezoelectric ceramics[J]. Optics and Precision Engineering,1998,6(5): 26-32.
- [20] KAJIMOTO. Pervasive haptics[M]. Tokyo: Springer Japan,2016:25-30.
- [21] HAYWARD V,CRUZ-HEM J M. Tactile display device using distributed lateral skin stretch[C]//S. l. : Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems IMECE 2000 Conference,2000:1309-1314.
- [22] YASUSHI I,MARIKO Y,SHUICHI F. A new design of haptic texture display-texture display2-and its preliminary evaluation[C]//S. l. : Virtual Reality Conference,2001:21-28.
- [23] 星貴之. 2A2-B04 粘性流体を用いた空中超音波触觉ディスプレイの圧力分布の可視化(触觉と力覚(2)) [C]//東京:ロボティクス? メカトロニクス講演会講演概要集,2015:1-3.
- [24] 郭小辉,黄英,腾珂,等. 柔性温度压力仿生皮肤的模块化设计与实现[J]. 机器人,2015,37(4):493-498.
GUO Xiaohui,HUANG Ying,TENG Ke,et al. Modular design and implementation of flexible temperature and pressure bionic skin [J]. Robot, 2015, 37 (4): 493-498.
- [25] 王秀荣,许京荆,李朝东,等. 压电驱动器激励的触觉显示器结构设计及有限元分析[J]. 现代机械,2008(6):24-27.
WANG Xiurong, XU Jingjing, LI Zhaodong, et al. Structure design and finite element analysis of tactile display driven by piezoelectric actuator [J]. Modern Machinery,2008(6): 24-27.
- [26] YAMAMOTO A, KIM K Y, HIGUCHI T. Tactile telepresence system using PVDF sensors and electrostatic stimulator[C]//Edmonton: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE,2005:1766-1771.
- [27] 石金进,吴海彬,马志举. 一种新型机器人仿生皮肤的设计[J]. 机器人,2013,35(1):32-38.
SHI Jinjin,WU Haibin,MA Zhiju. Design of a new robot bionic skin[J]. Robot,2013,35(1): 32-38.
- [28] MASASHI K, AKINORI Y, SATOSHI T, et al. A tactile synthesis method using multiple frequency vibrations for representing virtual touch [C]//Edmonton: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,2005:1121-1127.
- [29] 廖华瑞,张子青,朱鹤孙. 高分子复合压电材料及在微压力传感器中的应用[J]. 兵器材料科学与工程,1987(4):53-58.
LIAO Huarui,ZHANG Ziqing,ZHU Hesun. Polymer composite piezoelectric materials and their applications in micro pressure sensors[J]. Ordnance Material Science and Engineering,1987(4): 53-58.
- [30] KHAN S,DAHIYA R,TINKU S,et al. Conformable tactile sensing using screen printed P(VDF-TrFE) and MWCNT-PDMS composites [C]//Waimea: Sensors IEEE,2015:862-865.
- [31] 林书玉,桑永杰,田华. 径向复合压电陶瓷超声换能器的径向振动特性研究[J]. 声学学报,2007,32(4): 310-315.
LIN Shuyu,SANG Yongjie,TIAN Hua. Research on radial vibration characteristics of radial composite piezoelectric ceramic ultrasonic transducer[J]. Journal of Acoustics,2007,32(4): 310-315.
- [32] ERP J B F V. Guidelines for the use of vibro-tactile displays[C]//S. l. : Eurohaptics 2002 Conference Proceedings,2002:18-22.
- [33] 张文. 德州仪器推出业界最高集成度的压电式触觉驱动器[J]. 可编程控制器与工厂自动化,2011:21.