

基于摩擦力控制的触觉再现系统研究

马露, 陆熊

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏南京 210016)

摘要:作为新兴的人机交互技术,触觉再现技术能够再现虚拟物体的表面特性,提高虚拟现实系统的真实性。在目前现有的触觉再现技术中,基于摩擦力控制的触觉再现技术能够实现连续的、精细的纹理触觉再现,已成为触觉再现领域的一个研究热点。因此,设计一套基于摩擦力控制的触觉再现系统就显得尤为重要。基于此,文中利用空气压膜效应原理,设计了一套基于摩擦力控制的触觉再现系统,该系统能够实现虚拟纹理的触觉输出。文中首先描述了空气压膜效应的产生机理,然后详细讲述了该触觉再现系统的整体构成,最后,通过一系列的触觉感知实验验证了该系统的有效性。

关键词:触觉再现;空气压膜效应;摩擦力控制;虚拟现实

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)01-0062-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.01.014

Research on Tactile Rendering System Based on Friction Control

MA Lu, LU Xiong

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: As a novel human-computer interaction technology, tactile rendering can express the surface characteristics of virtual objects, and enhance the realism of virtual reality systems. Among several tactile rendering technologies, friction control based technology can realize continuous and fine tactile perception, and has become a hot research in tactile rendering filed. Therefore, designing a tactile rendering system, which based on the friction control, is particularly important. Based on this, present a tactile rendering device in this paper based on friction control, by using the principle of squeeze film effect. Firstly, describe the mechanism of squeeze film effect. Then, demonstrate the whole structure of this system and several experiments are made to validate the effectiveness of this system at last.

Key words: tactile rendering; squeeze film effect; friction control; virtual reality

0 引言

在人类的视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉等感知系统中,触觉感知系统是人与环境之间双向信息交互的重要通道,其能形成其他感知系统无法实现的各种主动性行为,因此在人机交互领域具有重要的地位。

作为新兴的人机交互技术,触觉再现人机交互能够让操作者触摸、感知虚拟物体,实现对虚拟环境的主动探索。在虚拟现实系统当中,触觉再现技术能够让操作者感受到虚拟物体的纹理信息。在远程操作系统中,触觉再现技术能够将远程环境中的物体表面纹理信息反馈给操作者,使得操作者能够准确地识别物体^[1-2]。目前,现有的触觉再现系统主要有:基于振动

的触觉再现系统^[3-6]、基于力反馈设备的触觉再现系统^[7-8]、基于阵列的触觉再现系统^[9]、基于气体压力的触觉再现系统^[10]和基于摩擦力控制的触觉再现系统^[11-14]等。

基于摩擦力控制的触觉再现系统能够实现连续的、精细的纹理触觉再现,其已受到研究者们越来越多的关注。目前,研究者们使用了空气压膜效应原理^[15-17]来实现摩擦力的控制。

文中采用空气压膜效应原理,研制了一套基于摩擦力控制的触觉再现系统,并详细阐述了该系统的整体构成及软件设计。最后,通过实验验证了该系统的有效性。

收稿日期:2014-02-14

修回日期:2014-05-19

网络出版时间:2014-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61203319);国家自然科学基金(青年科学基金)(61203316);江苏省基础 Research 计划(自然科学基金)(BK2012383)

作者简介:马露(1989-),女,硕士,研究方向为人机交互与虚拟现实技术;陆熊,博士,副教授,研究方向为力触觉人机交互与虚拟现实、智能传感与嵌入式系统。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20141117.2207.028.html>

1 基于空气压膜效应的摩擦力控制原理

Wiesendanger^[16]在其关于消除气体轴承结构系统中摩擦力的论文中提出了“空气压膜效应”理论。所谓空气压膜效应是指对两个相对的平板表面中的某一个施加一定频率、一定幅度(峰峰值 70 V 左右)的激励信号,使之受迫振动。平板的高频振动使得平板间的空气分子受到能量的激发,产生挤压聚集现象。由于空气分子之间存在粘滞力作用,气体分子无法及时在一个振动周期内从侧面溢出,进而在两个平板之间形成一定厚度的高压空气即为压膜。

当人手指触摸振动平板时,人手指与平板之间也会产生压膜。当压膜产生的作用力超过人手指所施加的法向作用力时,手指与平板间将存在能改变平板表面交互摩擦力系数的空气“气垫”。该气垫使得人手指悬浮于平板的上方,即手指直接与空气“气垫”接触,达到了减小手指与平板间交互摩擦力系数的目的。通过控制平板振动的幅度,就可以控制平板与手指之间的摩擦力系数。该系统基于上述原理实现触觉面板与操作者手指之间交互摩擦力系数可控,进而实现纹理触觉再现。

2 系统整体构成

2.1 总体方案设计

文中所设计的触觉再现系统主要包括触觉再现模块、压电陶瓷激励模块、手指位置信息检测模块、摄像头模块、系统中央控制模块等。图 1 为系统的总体结构框图。

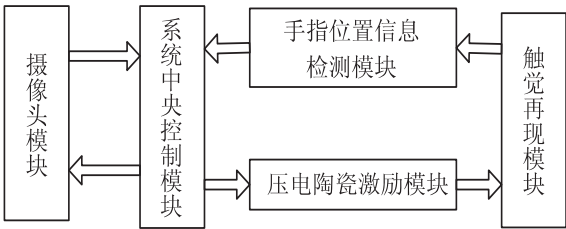


图 1 触觉再现系统的总体结构框图

2.2 触觉再现模块

该模块用于虚拟物体的触觉信息输出,是系统与操作者之间的人机交互接口。该触觉再现模块由定制的压电陶瓷片(直径 18 mm,厚 1 mm)和触觉面板组成。其中,触觉面板选用表面摩擦力系数比铜或钢要高很多的玻璃作为材料,其尺寸为 100 mm×62 mm×2 mm。压电陶瓷片通过粘贴剂粘贴到玻璃面板的下表面。其中,粘贴剂选用了 AB 型环氧胶。该系统中设计了不同规格的触觉面板,其实物图如图 2 所示。

2.3 压电陶瓷激励模块

该模块主要用于产生压电陶瓷片的激励信号,其主要由两部分组成:初始激励信号生成模块和初始激

励信号放大模块。

其中,初始激励信号生成模块主要由波形发生器 AD9833、数模转换器 AD5684 和模拟乘法器 AD633 等元器件设计而成。该模块生成的激励信号是由波形发生器生成的正弦波信号与数模转换器提供的模拟信号经过模拟乘法器合成后形成的。

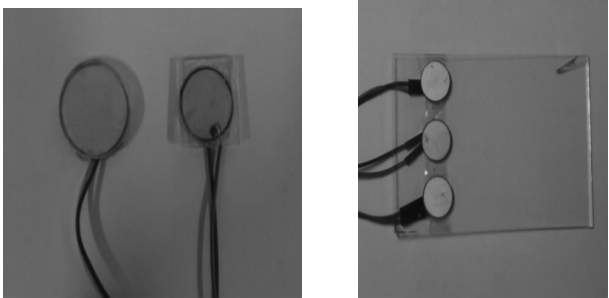


图 2 不同规格的触觉再现面板实物图

初始信号放大模块主要由运算放大器 OP249(一级电压放大)、运算放大器 OPA452(二级电压放大)、达林顿晶体管 PZTA29 和外延型晶体管 PZT2907AT1(电流放大)等元器件组成。初始激励信号经过该模块后最终形成峰峰值范围为 0 ~ 70 V,且频率可调的正弦波激励信号。

2.4 手指位置检测模块

手指位置信息检测模块主要包括线性传感器阵列 TSL1410R、菲涅尔透镜、线性激光光源和模数转换器 AD9280。该模块主要用于实现对操作者手指位置的实时追踪,并将手指的位置信息实时反馈给中央控制模块,用于实时调节正弦波信号的幅值。

手指位置检测模块主要利用光学检测法进行手指位置的检测。光学线性传感器 TSL1410R 与两组线性激光光源在平面上正交排列,当光源照射到线性传感器阵列上时,线性传感器阵列会输出正比于光照强度的电压信号,并且以一定的频率刷新。因此,当操作者手指置于触觉面板上时,由于光线受阻,会在线性传感器阵列上形成“阴影区域”,微处理器根据这个阴影区域就可以计算出操作者的手指位置。

由于线性激光光源发出的光是发散的,因此该模块采用菲涅尔透镜以获得平行光,以使得手指产生的阴影区域大小为固定值。

2.5 摄像头模块

该模块主要实现图像信息的采集和显示功能,其可结合触觉再现模块以实现视觉再现和触觉再现相结合的目的。图像信息的采集使用了图像传感器 OV9650,显示使用了 4.3 寸的 TFT 液晶显示模块 LR430LC9001。

2.6 系统中央控制模块

该模块选用基于 ADI 公司 DSP 处理器 BF609 的

硬件开发平台 WL_BF609 来实现。装置实物图如图 3 所示。

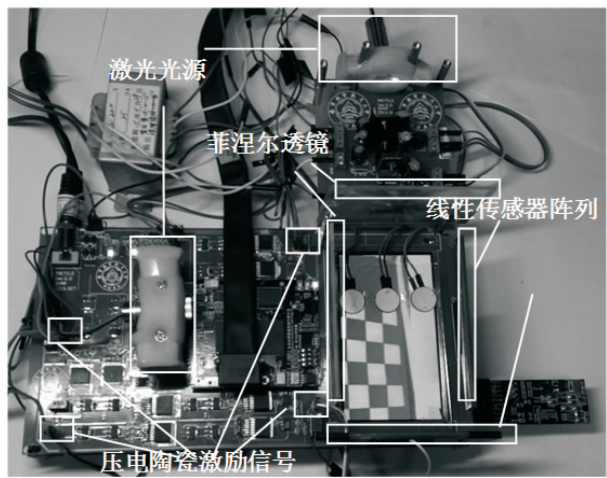


图 3 触觉再现系统实物图

在该模块的设计中,将核心板安装在自己设计的 PCB 板上,并通过板子反面的接插件与开发板相连,使三块板子结合到一起。这样的设计既可以充分利用开发板上现有的硬件资源,又可以很方便地设计系统所需的外围硬件电路。

微处理器 BF609 是通过并行输入/输出 (EPPI) 模块读取模数转换器 AD9280 采集到的模拟电压值,并存储在数组当中。一次采集完成后,就立即对存储的数据进行处理,计算得出操作者手指在触觉面板上的二维坐标。处理器 BF609 通过 SPI 接口实现对 AD9833 的控制,最终实现激励信号的频率可调;BF609 通过 SPI 接口给 AD5684 写入命令字和数据字,使其输出一个固定的模拟电压值(0.324 V 左右)和一个随手指位置变化而改变的模拟电压值。

3 系统软件设计

图 4 为触觉再现系统软件流程图。

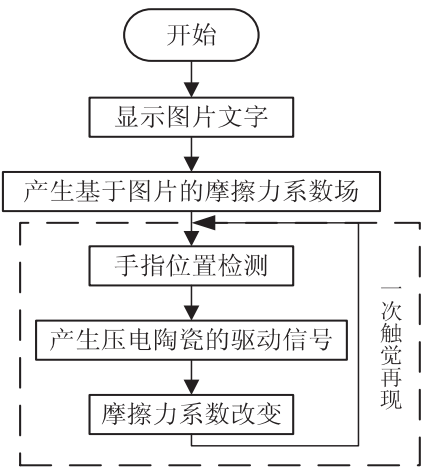


图 4 触觉再现系统软件流程图

该系统的主要工作过程如下：

- (1)系统首先加载头文件,完成各个模块的初始化工作;
- (2)利用摄像头采集图像信息,并将采集到的图像信息送给系统中央控制模块及液晶显示屏进行处理和显示;
- (3)系统中央控制模块对采集到的图像信息做相应的数字图像处理以提取出重要的特征值(如轮廓等),然后根据这些特征值建立相应的摩擦力系数场;
- (4)手指位置信息检测模块实现了摩擦力系数场到触觉面板之间的映射。当操作者手指在触觉面上滑动时,系统中央控制模块会根据手指的位置而产生一个电压信号,该电压信号反馈到压电陶瓷激励模块中用以改变激励信号的峰峰值,进而改变面板的振动幅度;
- (5)面板振动幅度的变化,使得操作者手指所能感受到的面板表面摩擦力的大小也在发生变化,这样操作者将感知到不同的触觉,完成一次触觉再现。

4 验证实验及结果分析

4.1 摩擦力系数感知阈值实验

实验的目的是研究人手指能感受到的摩擦力系数差值。在该实验中,可将摩擦力系数的差值等效为驱动电压峰值的差值。实验将触觉面板一分为二,并将左边区域的驱动电压峰值固定为 22 V,右边区域的驱动电压峰值从 0 V 开始并以 2 V 的步长增加直到实验对象不能感知到两边摩擦力系数的差异为止,则此次实验结束。其实验结果如表 1 所示。

表 1 电压感知阈值实验

实验对象	电压峰值/V	
	差值	平均值
S ₁	7.2	5.64
S ₂	4.2	
S ₃	5.8	
S ₄	6.6	
S ₅	4.4	

由表 1 可知,当两边驱动电压峰值的差值小于 5.64 V 时,人的手指就不能识别出两边摩擦力系数的不同了。

4.2 简单几何图形感知实验

该实验选择的几何图形为正方形和圆形,其中正方形边长为 15 mm,圆形直径为 10 mm,其实验结果数据如表 2 所示。

由表 2 可知,该系统能够实现简单几何图形的触觉输出,由此验证了该系统的有效性。

表2 几何图形感知实验数据

几何图形	实验对象					平均成功率/%
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	
正方形	成功	成功	成功	成功	成功	100
圆形	成功	失败	成功	成功	成功	90

5 结束语

文中利用空气压膜效应原理,设计了一套基于摩擦力控制的触觉再现系统。首先,文中详细地描述了触觉再现模块、压电陶瓷激励模块、手指位置检测模块、摄像头模块和系统中央控制模块的硬件方案设计。其次,描述了触觉再现系统的软件设计方案及系统的工作流程;最后,通过实验验证了该系统的有效性。

参考文献:

[1] Lederman S J, Martin A, Tong C, et al. Relative performance using haptic and/or touch-produced auditory cues in a remote absolute texture identification task[C]//Proc of 11th symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems. [s. l.]; IEEE, 2003: 151-158.

[2] Ikei Y, Shiratori M. TextureExplorer: a tactile and force display for virtual textures[C]//Proc of 10th symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems. [s. l.]; IEEE, 2002: 327-334.

[3] Rantala J, Salminen K, Raisamo R, et al. Touch gestures in communicating emotional intention via vibrotactile stimulation [J]. International Journal of Human-computer Studies, 2013, 71(6): 679-690.

[4] Rantala J, Raisamo R, Lylykangas J, et al. The role of gesture types and spatial feedback in haptic communication[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2011, 4(4): 295-306.

[5] Ahmaniemi T, Marila J, Lantz V. Design of dynamic vibrotactile textures[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2010, 3(4): 245-256.

[6] Ikei Y, Wakamatsu K, Fukuda S. Vibratory tactile display of image-based textures[J]. IEEE Computer Graphics and Ap-

plications, 1997, 17(6): 53-61.

[7] 李佳璐, 宋爱国, 吴 涓, 等. 基于 SFS 技术的纹理力触觉再现方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 812-817.

[8] 邹垂国, 宋爱国, 吴 涓. 基于 DELTA 手控器的纹理的力触觉表达方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(11): 2310-2314.

[9] Weiss M, Wacharamanotham C, Voelker S, et al. FingerFlux: near-surface haptic feedback on tabletops[C]//Proceedings of the 24th annual ACM symposium on user interface software and technology. Santa Barbara: ACM, 2011: 615-620.

[10] Asamura N, Yokoyama N, Shinoda H. Selectively stimulating skin receptors for tactile display[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1998, 18(6): 32-37.

[11] Mullenbach J, Johnson D, Colgate J E, et al. ActivePaD surface haptic device[C]//Proc of symposium on haptics interface for virtual environment and teleoperator systems. [s. l.]; IEEE, 2012: 407-414.

[12] Dai Xiaowei, Colgate J E, Peshkin M A. LateralPaD: a surface-haptic device that produces lateral forces on a bare finger [C]//Proc of IEEE haptics symposium. [s. l.]; IEEE, 2012: 7-14.

[13] Marchuk N D. The large area tactile display[D]. U. S. : Northwestern Univeristy, 2010.

[14] Winfield L, Glassmire J, Colgate J E, et al. T-pad: tactile pattern display through variable friction reduction[C]//Proc of EuroHaptics conference and symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems. Tsukaba: IEEE, 2007: 421-426.

[15] Biet M, Giraud F, Lemaire-Semail B. Squeeze film effect for the design of an ultrasonic tactile plate[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2007, 54(12): 2678-2688.

[16] Wiesendanger M. Squeeze film air bearings using piezoelectric bending elements[D]. Lausanne: EPFL, 2001.

[17] Watanabe T, Fukui S. A method for controlling tactile sensation of surface roughness using ultrasonic vibration[C]//Proc of IEEE international conference on robotics and automation. [s. l.]; IEEE, 1995: 1134-1139.

基于摩擦力控制的触觉再现系统研究

作者：[马露](#)，[陆熊](#)，[MA Lu](#)，[LU Xiong](#)
作者单位：[南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京, 210016](#)
刊名：[计算机技术与发展](#)[ISTIC](#)
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)
年，卷(期)：2015(1)

引用本文格式：[马露](#).[陆熊](#).[MA Lu](#).[LU Xiong](#) [基于摩擦力控制的触觉再现系统研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#)
2015(1)