

用于触摸屏图像感知的指端力触觉再现系统*

余玉卿¹, 宋爱国¹, 陈大鹏¹, 赵国普²

(1. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096; 2. 江苏四明工程机械有限公司 扬州 225800)

摘要:当用户与触摸屏交互时,有效和实时的力触觉交互技术对于增强现实感和沉浸感是非常重要的。设计了一种面向触摸屏图像信息感知的手指外骨架可穿戴式力触觉交互装置,利用平面四连杆机构作为外骨架传动机构,结合直流电机作为执行机构可为用户手部提供连续可控的力觉反馈,通过振动电机和压电陶瓷致动器提供两种类型的振动触觉反馈。该装置体积小、重量轻,功耗小,使用蓝牙通信,可扩展性强,方便使用及携带。为了表达图像中虚拟物体的空间力触觉信息,引入了实时的力触觉建模算法。当用户穿戴该装置在图像上滑动时,图像的一些特征信息将通过蓝牙与装置通信,包括每个像素点的形状高度和图像的边缘轮廓信息,能够使用户获得丰富的力触觉感受。最后,进行力触觉交互实验来评估该装置在表达触摸屏中图像的高度、轮廓和纹理等方面的性能。

关键词:力触觉交互;手指外骨架;多模式;力触觉建模

中图分类号: TP391 TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Fingertip haptic rendering system for touch screen image perception

Yu Yuqing¹, Song Aiguo¹, Chen Dapeng¹, Zhao Guopu²

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Siming Engineering Machinery Co., Ltd, Yangzhou 225800, China;)

Abstract: When users interact with touch screen, effective and real-time haptic interaction technology is very important to enhance the sense of reality and immersion. In this work, a finger-skeleton wearable haptic interactive device is designed to interact with images on a touch screen. The device can provide continuously controllable force feedback for the finger by planar four-bar linkage and DC motor. Two types of vibrotactile feedbacks by a linear resonant actuator and piezo-ceramic actuator can also be provided. The device uses Bluetooth technique and rechargeable battery to achieve miniaturization and portability, which is small size and light weight. In order to display space haptic information of virtual objects in an image, real-time haptic modeling algorithm is introduced. When operator uses the haptic device to slide on an image, feature information of the image can be transmitted to the device via Bluetooth, including the height of each pixel, the edges of an image and the shape of virtual objects, so that operator can get multi-mode haptic sensation. Finally, haptic interaction experiments are carried out to evaluate the performance of the haptic device in displaying the height, contour and edge of an image.

Keywords: haptic interactive; finger-skeleton; multi-mode; haptic modeling

1 引言

近年来移动终端发展迅速,在日常生活中广泛使用,

用户通过触摸屏^[1]能够轻松地与移动终端进行交互。目前,带有触摸屏的移动终端在人机交互领域主要集中在音频交互和视觉交互^[2],力触觉的功能仍比较有限,且几乎没有对于图像的力触觉感知^[3],把图像力触觉交互技

术应用于移动终端将会给用户带来全新的交互体验。在微创手术中,利用力触觉交互技术可以帮助医生提高探测肿瘤和动脉的成功率^[4];在电子商务、艺术品展示及教学等方面^[5],利用力触觉交互技术在虚拟环境中给用户提供方触觉感知反馈^[6]。为了实现更加全面的人机交互,将力触觉感知引入到虚拟环境中显得越来越重要。力触觉交互泛指以感知和操作物体为目的的触摸交互,其作为独特的存在双向信息交互的感知通道,近年来已获得越来越多的关注。如果能够把虚拟环境中的力触觉信息真实地反馈给人,那么虚拟环境的交互性和临场感程度将会有效提高,从而增强交互式远程呈现^[7]。当触摸屏中应用力触觉交互技术时,可以有效地扩大其功能和应用范围。然而,安装在触摸屏中的线性马达只能产生较为简单的振动触觉反馈,不足以表达丰富的触觉信息,因此需要具有多模式力触觉反馈的交互设备,其能够表达虚拟物体的纹理及轮廓特征,并且能够为用户提供丰富的力触觉感受,有助于触摸屏中图像信息感知,对于识别和感知虚拟物体具有重要意义。

随着配备触摸屏的移动终端的大规模广泛使用,国内外掀起了对面向触摸屏的触觉再现与交互技术领域研究的热潮。韩国成均馆大学的 Koo I. M. 等人^[8]设计了一种基于电活性聚合物的阵列式柔性力触觉再现指套,能提供较为精准的触觉体验。但是由于该设备需要高压驱动,在实际使用时有很大的局限性。Frederiks A. D. 等人^[9]研制出一款穿戴于手臂的力触觉反馈装置,该装置包含振动致动器阵列,可以通过测量手臂的运动速度、位置等信息反馈振动力触觉刺激。美国 Virtual Technology 公司开发了一款 CyberGrasp 力反馈数据手套^[10],手指关节弯曲角度由独立数据手套上的电阻式传感器测得,驱动器由 14 个高精度直流电机和传输机构组成,但是手套重量达到 350 g,不适合操作者长时间佩戴。

对于面向触摸屏的力触觉再现系统的设计,不仅需要考力触觉反馈功能的实现,而且应该考虑到系统装置的通用性、稳定性、便携性、小型化等问题,实现起来难度较大。目前应用于移动终端领域的可穿戴式力触觉再现装置大多只能表达振动触觉反馈信息,力觉反馈信息^[11]的表达仍在起步阶段,主要原因是需要设计机电结构^[12],体积相对较大,设计更为复杂^[13],无法很好与移动终端结合。此外,现有的力触觉交互装置只是跟踪在屏幕上的交互点,很少考虑手指的姿态、按压力等主动交互信息。在设计指端力触觉再现系统时,既要考虑便携性、体积以及功耗等特性,同时采集交互过程中人的主要交互信息,提高装置性能。

本文基于自主设计的外骨架式机电结构和压电陶瓷致动器开发了一种面向触摸屏图像信息感知的手指外骨

架可穿戴式力触觉交互装置,使用适用于触摸屏中虚拟物体表面物理特性的触觉建模和再现算法来提取图像的高度和边缘信息。对设计的软件算法尽可能精简模型运算量,避免对触觉再现的实时性造成影响,实时力触觉再现刷新速度可以达到 24 帧/s,计算刷新速度达到 50 帧/s。该装置集成了多种执行机构,能够产生不同模式的力触觉反馈,从而表达触摸屏中图像每个像素点的形状高度和图像的边缘轮廓信息。该可穿戴式装置是一个独立的系统,其体积小、稳定且低功耗、实现了轻量化、方便穿戴。用户穿戴使用该装置时食指直接与触摸屏进行交互,设计的机电结构可以最大限度地满足人手指关节的运动范围,能够直接对手食指指尖的神经产生刺激,为其提供丰富的力触觉交互感受,对于提高力触觉反馈的真实感和逼真度具有重要的意义。

2 力触觉交互装置设计

2.1 整体系统设计

本文主要设计和实现了一种面向触摸屏图像信息感知的手指外骨架可穿戴式力触觉交互装置。该装置通过用户手指末端直接与触摸屏进行交互,能够实现多模式的力触觉反馈,表达触摸屏中虚拟物体的高度和边缘轮廓等三维特征信息,增强交互过程中的真实性和沉浸感。

系统整体原理框图如图 1 所示,通过设计力触觉交互软件的图像处理算法,提取图像的高度特征信息和边缘信息。手指可穿戴式交互装置主要包括外骨架式机电结构和驱动电路两部分。驱动电路具体包括电源模块、直流电机驱动模块、压电陶瓷致动器驱动模块、蓝牙通信模块、振动电机及其驱动模块、MCU 控制模块、可充电电池、拨动开关。通信模块使用蓝牙模块 HC-05 来实现,主要用于外骨架可穿戴式装置与触摸屏之间的通信。MCU 控制模块中包含 STM32 微处理器,用于控制各类执行机构的工作及信息的交互。执行机构包括可穿戴外骨架式机电结构、压电陶瓷致动器和振动电机。驱动电路部分集成在一个长方体盒中,盒子两侧各有一小孔,穿有紧固腕带,可将测控电路部分固定于人手掌表面。用户穿戴该装置与触摸屏之间的交互作用如图 2 所示,当人手食指指尖从触摸屏中图像某像素点 $A(x_A, y_A)$ 滑动到像素点 $B(x_B, y_B)$ 位置时,通过图像处理算法解算出对应像素点的高度特征信息和边缘信息,并通过蓝牙发送给手指外骨架式交互装置,微处理器控制驱动电路驱动相应的执行机构产生可控的力触觉交互效果,从而使得用户穿戴该装置在触摸屏上滑动的过程中能感受到图像的高度和形状轮廓信息。

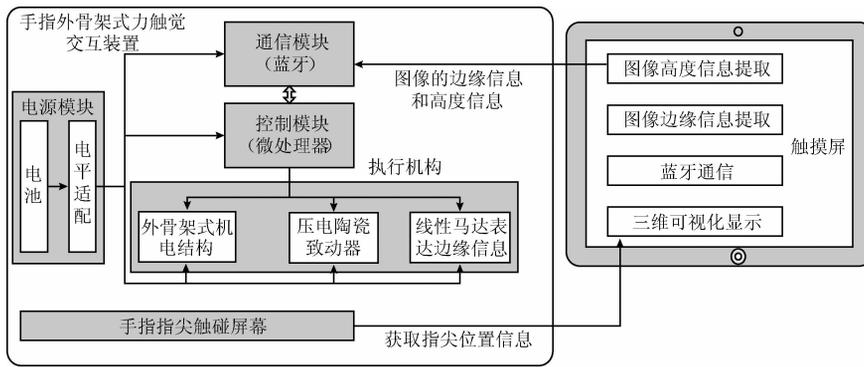


图1 系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of the system



图2 穿戴设备与触摸屏交互作用示意图

Fig. 2 Photograph of the interaction between the device and touch screen

2.2 机电结构设计

本文设计的装置针对面向触摸屏的便携性,独立设计并开发了手指外骨架可穿戴式机电结构,在最大限度地满足人手指关节的运动范围内,能够直接对人手指产生力触觉反馈,实现触摸屏中图像的特征信息感知与再现。该装置使用 Maxon 电机作为力驱动装置,电机直径只有 8 mm,尺寸较小巧,便于后续机电结构的设计和使用。通过微处理器控制电机的旋转速度和圈数,从而改变丝杆上滑块运动的速度及位移量,通过手指外骨架机构的传动可将力矩传递到用户手指指端,在食指指尖产生相应的力,从而获得图像表面凹凸的阻尼感受。图3所示为外骨架式机电结构部分示意图。主要包括手指外骨架基座、电机、电机座、光电编码盘、连杆、固定件、连接件、滑块、压电陶瓷致动器等。具体分析来说,由于滑块与固定件质心的距离为定长,固定件与连接件质心之间也为定长,因此可将上述的机构简化为平面四杆机构。其中传动机构中的连杆部分根据成年人的食指各关节尺寸的平均值设计,包括贴近手指中节内侧的底板,底板前后两端分别连接向上折起的前折板和后折板,前折板及后折板上分别设有供人手食指穿过的通孔,设计的连杆两侧装有压电陶瓷致动器。通过控制压电陶瓷致动器驱

动电压和频率的变化,使用户产生不同的振动触觉感受,从而进行图像纹理及轮廓的表达。位于连杆中底板部分的力传感器可以测量其力反馈的大小,实现闭环控制,产生力反馈感知,从而能够对人手指的力觉反馈进行连续精确地控制,产生良好的连续力觉反馈效果。手指外骨架基座下端为供人手食指近端节佩戴的通孔,操作者在使用时穿有可调节固定带,可以根据不同人的手指尺寸大小调节松紧。基座上端为两个对称设计的竖板,两竖板通过轴与电机座连接,电机座与电机通过螺纹配合保持相对固定,因此电机通过电机座可以绕轴相对于基座产生转动。滑块套设在电机丝杆上,滑块与电机丝杆螺纹配合,固定件通过左右对称的两个螺钉与滑块保持相对固定,从而可以将滑块限位,这使得滑块在电机丝杆的带动下只能产生前后位移,不会产生转动。连杆与基座通过轴间隙配合,连杆绕轴可相对手指外骨架基座转动,连杆上方与连接件螺纹配合保持相对固定,连接件与固定件通过轴间隙配合。

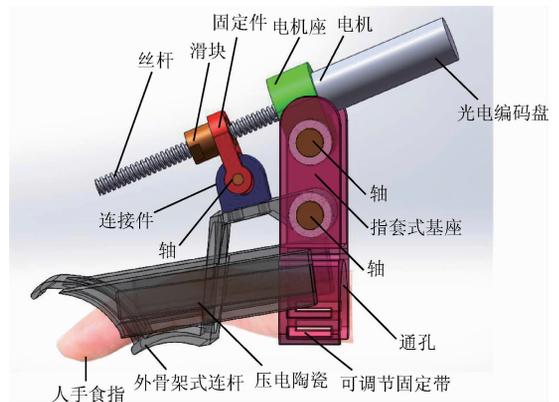


图3 外骨架式机电结构

Fig. 3 Schematic diagram of the finger-skeleton electromechanical structure

3 力触觉建模

3.1 基于图像光照信息的物体高度信息提取

三维环境中虚拟物体的高度信息可以通过图像中物体表面形成的纹理、阴影、轮廓等特征来计算,本文中选用暗恢复形状技术(shape from shading, SFS)算法^[14]来提取虚拟对象的表面高度信息,考虑到本装置中的三维形状恢复是面向触摸屏的,因此,选用属于线性方法的Tsai&Shah算法。算法的关键是将反射函数进行泰勒展开,保留展开项中的线性部分,从而将SFS算法转化为线性,然后利用Jacobi迭代计算得出图像中物体表面的高度特征信息。根据朗伯体光学定理,假设图像中某像素点坐标 (x,y) 的灰度值为 $E(x,y)$, $R(x,y)$ 与 $E(x,y)$ 等价均对应为原始对象中点坐标为 (x,y,z) 的反射强度, $R(x,y)$ 可表示为:

$$E(x,y) = R(p,q) = \frac{(1 + pp_0 + qq_0)}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_0^2 + q_0^2}} \quad (1)$$

式中: $p = \partial_z/\partial_x$, $q = \partial_z/\partial_y$,然后通过有限差分法离散化反射函数,反射函数的离散形式可以表示为:

$$p = z(x,y) - z(x-1,y) \quad (2)$$

$$q = z(x,y) - z(x,y-1) \quad (3)$$

因此式(1)可被重写为:

$$0 = f[z(x,y)] = E(x,y) -$$

$$R[z(x,y) - z(x-1,y), z(x,y) - z(x,y-1)] \quad (4)$$

对反射函数进行泰勒展开,然后进行线性逼近,可得:

$$z^n(x,y) = z^{n-1}(x,y) + \frac{-f[z^{n-1}(x,y)]}{\frac{df}{dz}(x,y)} [z^{n-1}(x,y)] \quad (5)$$

假设图像中所有像素点的初始高度 $Z^0(x,y) = 0$ 。根据式(5)经过 n 次迭代即可获得 $Z^n(x,y)$,即像素点 (x,y) 处的高度值,所得高度值均为非负数。

3.2 图像边缘信息提取

本文设计的面向触摸屏图像信息感知的力触觉交互装置利用振动电机来表达图像的轮廓信息。边缘提取的过程表示如下:1)首先将触摸屏中原始图像转换为灰度图像;2)利用中值滤波去噪;3)采取Sobel算子提取图像边缘轮廓信息,算法复杂度低,效果优良。但Sobel算子没有将图像的主体和背景严格地区分开来,因此提取图像边缘信息后,采用图像二值化技术将灰度图转化为黑白图。针对不同图像,本文采用最大类间方差算法^[15]来自动选取阈值进行二值化,其选择阈值的评判方法是使用聚类的思想,目标和背景类间方差最大的分割意味着错分概率最小^[16-17]。设整幅图像的像素灰度值可以分

为 L 个等级,即 $[1,2,3,\dots,i,\dots,L]$ 。其中,灰度级为 i 的像素点数共有 n_i 个,因此,总像素点数量可以表示为 $N = \sum_{i=1}^L n_i$ 。灰度直方图的概率分布为:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad p_i > 0, \quad \sum_{i=1}^L p_i = 1 \quad (6)$$

设灰度级 k 为阈值,则图像可被分为轮廓和背景两类,分别表示为 C_o 、 C_B 两类, C_o 包含灰度级为 $[1,\dots,k]$ 的像素, C_B 包含灰度级为 $[k+1,\dots,L]$ 的像素。那么两类出现的概率分别为:

$$\omega_o = P(C_o) = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k) \quad (7)$$

$$\omega_B = P(C_B) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k) \quad (8)$$

C_o 、 C_B 对应的平均灰度级分别为:

$$\mu_o = \sum_{i=1}^k i \times P(i | C_o) = \sum_{i=1}^k \frac{ip_i}{\omega_o} = \frac{\mu(k)}{\omega(k)} \quad (9)$$

$$\mu_B = \sum_{i=k+1}^L i \times P(i | C_B) = \sum_{i=k+1}^L \frac{ip_i}{\omega_B} = \frac{\mu_L - \mu(k)}{1 - \omega(k)} \quad (10)$$

图像的总灰度平均值为:

$$\mu_L = \mu_o \omega_o + \mu_B \omega_B \quad (11)$$

轮廓与背景的像素类间方差为:

$$\sigma^2(k) = \omega_o(\mu_o - \mu_L)^2 + \omega_B(\mu_B - \mu_L)^2 \quad 1 \leq k \leq L \quad (12)$$

k 在 $1 \sim L$ 取值,当 $\sigma^2(k)$ 最大时,其对应的阈值 k^* 即为最佳阈值。

当用户穿戴该装置与触摸屏中图像进行交互时,微处理器接收提取到的图像边缘信息并驱动振动电机。振动电机是一种小型振动器,响应速度快、振动强烈、功耗低。当用户触摸到图像的边缘轮廓时,振动电机将迅速起振,产生轮廓碰触感。利用振动电机和压电陶瓷致动器能够产生不同的振动触觉反馈,可以提高力触觉交互过程中的真实感和逼真度。

4 图像信息的力触觉再现

4.1 图像信息的力觉表达实现

当用户穿戴该力触觉反馈装置从触摸屏中图像上的像素点 A 滑动至像素点 B 时,力触觉交互软件通过图像处理算法分别计算得出两个像素点的高度分布信息 h_A 和 h_B ,定义两个像素点的高度差的力觉表达形式为:

$$\Delta h_{BA} = h_B - h_A = \Delta h \propto \Delta F = k(x_B - x_A) = k \cdot \Delta x \quad (13)$$

式中: Δh 是 A 、 B 像素点的高度差, x_B 、 x_A 为对应像素点的滑块位移量, Δx 为滑块在 A 、 B 点间位移的变化量。通过STM32微处理器的控制,电机丝杆带动滑块产生前后

运动,通过外骨架式机电结构中连杆的传动带动人手食指产生上下位移。具体分析来说:若 $\Delta h_{BA} > 0$,即 B 像素点的图像高度高于 A 像素点,控制器通过发送相应的指令给直流电机,使电机上丝杆带动滑块向后运动产生 Δx_1 的位移,由于固定件与滑块保持相对固定,滑块的位移通过外骨架式机构的传递会带动连杆产生向上的位移。在初始位置时手施加在触摸屏上的压力与触摸屏给手的支持力是一对平衡力,当连杆通过传动机构产生向上的位移时,连杆给手瞬时的向上拉力,从而人手会感受到向上的拉力,手指在滑动过程中能感受到图片的凸起,触摸屏给人手的作用力也会随之变化,最终使得人手的受力达到新的平衡。反之,如果 $\Delta h_{BA} < 0$,电机丝杆带动滑块向前运动产生 Δx_2 的位移,因此人手感受到向下的瞬时拉力,滑动过程中能感受到图片的下凹。位于连杆底部的力传感器可以测量其力反馈的大小,实现闭环控制,产生力反馈感知,从而能够对手指的力觉反馈进行连续精确地控制,从而获得图像表面形状凹凸(即图像高度)的感受,产生良好的连续力觉反馈效果。

本文设计的手指外骨架可穿戴式力触觉交互装置利用平面四杆机构传递力来表达图像的高度信息,为验证该装置的性能,搭建实验平台,对该力触觉再现装置进行力觉输出标定,实验中采用艾德堡数显推拉力计标定。如图4所示,力触觉交互装置与测量力计相对固定后,当细绳处于刚被拉紧的临界状态时,将该数值作为标定起点。通过力触觉交互软件控制,每次让 Maxon 电机丝杆旋转2圈,丝杆上的滑块计算每次前进1 mm,将每次的读数记录并进行数据分析,如图5所示。当滑块位移为1.9 cm时,电机输出的拉力为3.47 N。使用最小二乘法拟合实验数据,根据拟合曲线所得图像高度与电机输出力近似满足线性关系,从而验证可以有效地控制电机丝杆上滑块的运动速度及位移量,产生相应的力觉交互效果。

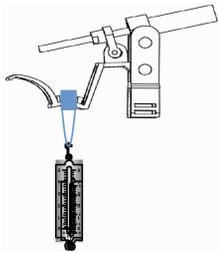


图4 标定示意图

Fig. 4 Schematic diagram of calibration

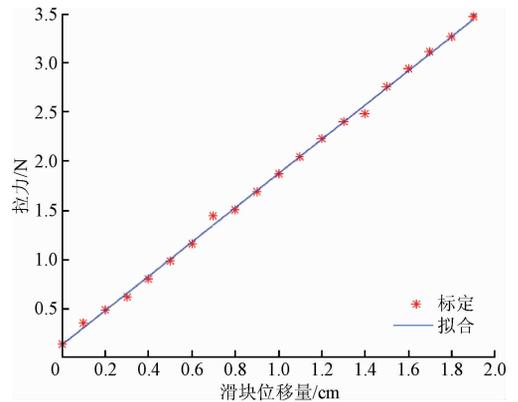


图5 力觉输出标定结果及拟合曲线

Fig. 5 Results of force calibration and fitting curve

4.2 图像信息的触觉表达实现

力触觉交互装置利用设计的外骨架式机电结构表达图像高度,此外系统中压电陶瓷致动器也可以用于显示图像的高度。利用压电陶瓷材料高频下的逆压电效应产生向上或向下位移的振动。通过设定压电陶瓷振动器的振幅及频率能够对图像的高度分布信息进行表达,将触摸屏中图像每个像素点高度对应到一个电压及频率信号,从而实现具有精细振动感觉的可控振动触觉反馈。

5 实验及分析

5.1 压电陶瓷致动器振动频率感知实验

在该实验中随机挑选15名年龄在20~35岁的受试者进行实验。有5种压电陶瓷致动器的振动频率供受试者选择。频率范围为140~260 Hz,间隔为30 Hz。要求受试者分别用5种频率模式触摸图像。考虑到人类的触觉记忆时间非常短,实验允许受试者穿戴该装置在任何频率模式下重复地触摸和感知图像。然后,要求受试者对5种频率模式评分。压电陶瓷致动器的5种模式的平均分数如图6中的直方图所示。经分析可得频率采用200 Hz时分数平均值最高,且标准差较小。这表明当频率设置为200 Hz时可以实现最佳的振动触觉效果。因此在后续力触觉实验中,当使用压电陶瓷致动器显示图像的高度时,默认将频率设置为200 Hz。

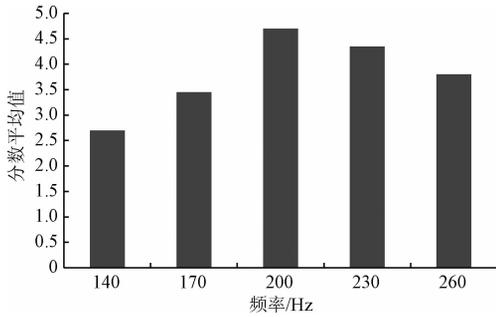
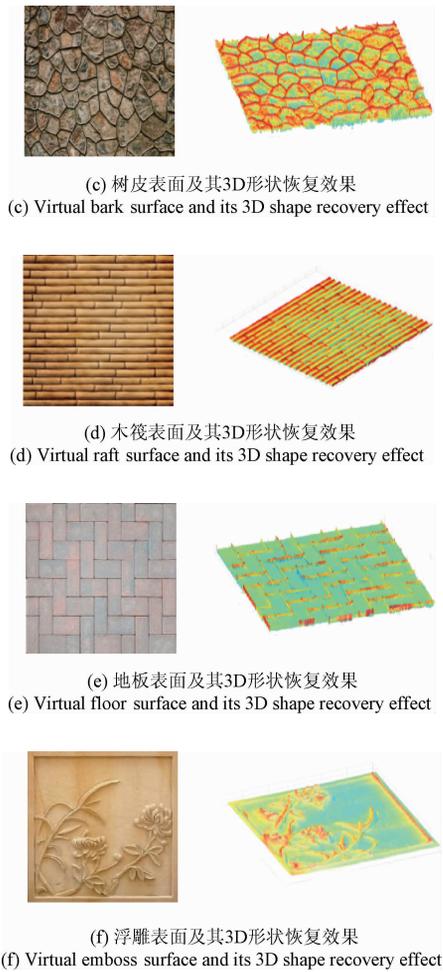


图6 振动频率感知实验结果统计

Fig. 6 Statistical results of vibration frequency perception

5.2 多模式力触觉交互实验

为了观察在所设计装置中不同力触觉交互模式下人的感知差异,本实验随机挑选 20 名年龄在 20 ~ 35 岁的受试者进行试验,他们均无力触觉方面的健康问题。本实验选取纹理库中的 6 幅纹理图像,该 6 幅图像反映了不同材质和不同尺度的纹理信息。在正式实验前,先对实验中使用的 6 幅图像单独进行实验,受试者选择一幅图像,然后必须采用 5 种力触觉交互模式分别感知此图像,考虑到人的触觉记忆非常短暂,允许受试者重复触摸。图 7 所示为该 6 幅图像及其用 SFS 算法恢复出的三维特征信息。5 种力触觉交互模式具体如下:1) 振动电机用于表达图像的边缘信息;2) 可穿戴外骨架式机电结构用于表达图像的高度信息;3) 机电结构表达显示图像的高度信息,同时振动电机用于表达图像的边缘信息;4) 压电陶瓷致动器用于表达图像的高度信息;5) 压电陶瓷致动器用于表达图像的高度信息,同时振动电机用于表达图像的边缘信息。最后,要求受试者对每个模式在从 0 ~ 10 的范围内做一个定量打分,最大值 10 代表 5 个模式中力触觉交互效果最好的模式,也就是人能够清晰地感知到图像的空间力触觉信息。



(c) 树皮表面及其3D形状恢复效果
(c) Virtual bark surface and its 3D shape recovery effect

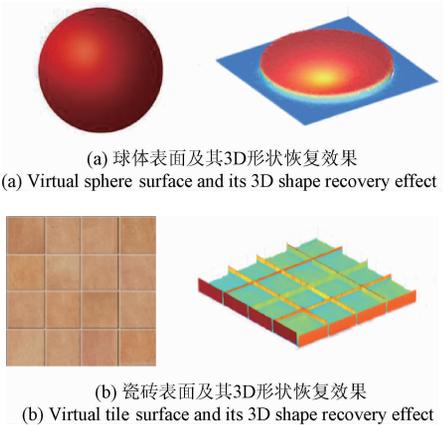
(d) 木筏表面及其3D形状恢复效果
(d) Virtual raft surface and its 3D shape recovery effect

(e) 地板表面及其3D形状恢复效果
(e) Virtual floor surface and its 3D shape recovery effect

(f) 浮雕表面及其3D形状恢复效果
(f) Virtual emboss surface and its 3D shape recovery effect

图7 实验中使用的6张图

Fig. 7 Six pictures used in the experiments



(a) 球体表面及其3D形状恢复效果
(a) Virtual sphere surface and its 3D shape recovery effect

(b) 瓷砖表面及其3D形状恢复效果
(b) Virtual tile surface and its 3D shape recovery effect

力触觉交互实验的统计结果如图 8 所示,图中纵坐标为 20 位受试者打分的平均值。可以得到如下结论:1) 模式 1 得分最低,经分析可得振动电机只能获取图像的边缘信息,但是由于图像高度分布信息的缺失,使得图像的空间感降低;2) 一般来说,模式 3 分数最高,从而证明了该装置利用所设计的外骨架式机电结构提供连续可控的力觉反馈与振动触觉反馈结合可以获得力触觉交互的最佳效果;3) 边缘振动可以增加对于具有清晰的外轮廓和很少内轮廓的图像(例如图 7(a)和(b))的触觉交互的效果,但是对于具有大且不规则的内部轮廓的图 7(c)和(f),边缘振动不应该用于显示图像的轮廓。这是因为人类的手指具有较低的空间和振动分辨率。振动电机产生的振动感觉对于用户感知图像的空间信息来说太频繁,容易对操作者产生干扰。

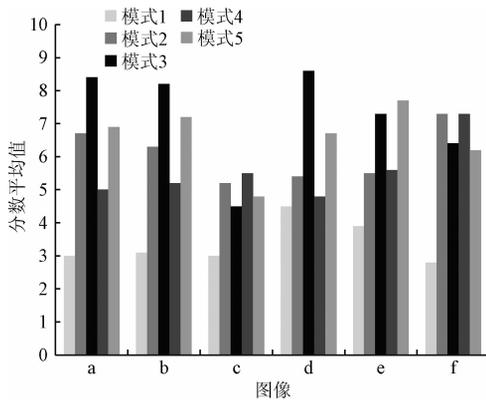


图8 五种模式力触觉交互实验结果统计图

Fig.8 Statistical results of five modes of haptic interaction experiments

建模算法能够准确地交互和再现触摸屏中虚拟物体的空间力触觉信息。

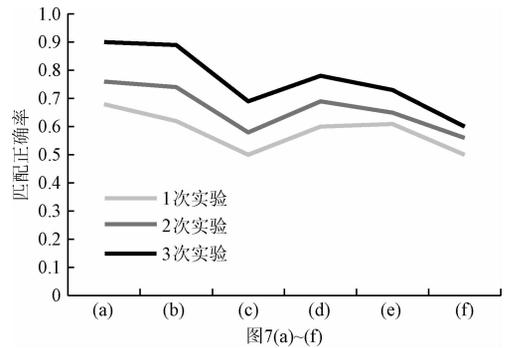


图9 图像信息感知实验结果统计

Fig.9 Statistical results of image information perception experiments

5.3 图像特征信息感知实验

为了验证本文设计的手指外骨架可穿戴式力触觉交互装置对于图像特征信息的力触觉表达的有效性,进行了图像特征信息感知实验。本实验随机挑选25名年龄在20~35岁的受试者进行试验。本实验中使用上述图7所示的6幅虚拟纹理图像进行图像信息感知实验。在本实验中,图像本身不可见,均以编号形式随机出现,受试者穿戴该装置在触摸屏中的图像上滑动,对图像信息进行力触觉感知。当受试者感知完一幅图像后,需要从6幅实验图像中选出所感知的纹理图像,直到6幅图像全部感知完毕,由于人的触觉感知记忆时间很短,因此允许受试者对实验图像进行重复感知,最后统计感知正确率。当每个受试者完成6幅图像感知为一轮实验,在相同的实验条件下,受试者将重复3次实验,最后统计实验结果。

实验的统计结果如图9所示,图中纵坐标为25位受试者的6幅图像的匹配正确率。总结可得如下结论:1)3轮实验的匹配正确率逐渐增加且6幅图像的平均匹配正确率均较高,这一结果表明受试者穿戴该装置进行图像信息感知时,能够逐渐与图像纹理特征相匹配,能够较好地获取图像中虚拟物体的空间力触觉信息;2)3轮实验中,图7(a)、(b)和(d)得到了较高的匹配率,说明本文提出的图像高度和边缘信息算法能够有效地表达较规律的具有周期性的纹理特征;3)图7(c)和(f)具有不规则的纹理特征,其匹配正确率相对较低,主要是由于本文中采用明暗恢复形状算法来恢复图像中物体表面的三维几何形状。图像物体表面颜色的不均匀分布和光的不均匀分布对于图像高度信息的提取具有一定的影响,因而会导致受试者在穿戴所设计的装置进行图像信息感知时,纹理特征信息表达有一定的不准确。总体来说,本文中设计的手指外骨架式力触觉交互装置和采用的力触觉

6 结论

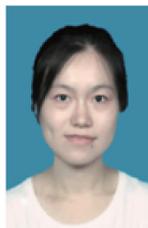
本文设计了一种新型的手指外骨架可穿戴式力触觉交互装置,主要用于触摸屏中的图像特征信息感知。与以前的单一触觉交互方法相比,该装置集成了多模式的力触觉交互方法能够使得用户获得更全面和更逼真的人机交互效果。该装置体积小、重量轻、功耗小,使用蓝牙通信,可扩展性强,方便使用及携带,解决了在现有阶段可穿戴式力触觉交互装置体积和功耗均较大等诸多问题。本文介绍了力触觉交互装置的整体结构设计,其中外骨架式机电结构用于提供力反馈,压电陶瓷致动器和振动电机用于提供振动触觉反馈。引入图像特征提取算法,可以提取和表达触摸屏中虚拟对象的空间触觉信息。最后,进行了相应的力触觉交互实验用于评估该装置的性能。实验结果表明,用户通过穿戴该装置与触摸屏进行交互,对于用户特别是视力受损的人感知图像的三维特征信息如高度、轮廓和纹理等,识别虚拟对象具有极大的帮助,对于进一步提高人机交互的临场感具有重要意义。

参考文献

- [1] WITHANA A, KONDO M, MAKINO Y, et al. ImpAct: Immersive haptic stylus to enable direct touch and manipulation for surface computing [J]. Computers in Entertainment (CIE), 2010, 8(2): 9.
- [2] 周尧, 张丰华, 杨林, 等. 触摸屏触感振动反馈设计研究[J]. 机械工程师, 2014 (1): 90-92.
ZHOU Y, ZHANG F H, YANG L, et al. Design and research on the vibrational haptics of the touchscreen [J]. Mechanical Engineers, 2014 (1): 90-92.
- [3] 吴涓, 宋爱国, 李建清. 图像的力/触觉表达技术研究

- 综述[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(5): 1-3.
- WU J, SONG AI G, LI J Q. Research summarization of image expression with haptic rendering [J]. Computer Application Research, 2007, 24(5): 1-3.
- [4] LIU P X, ZHENG W, CHEBBI B. Surgical simulation with high-fidelity haptic feedback [J]. International Journal of Robotics & Automation, 2007, 22(1): 59-68.
- [5] MAGNENAT-THALMANN N, BONANNI U. Haptic sensing of virtual textiles [M]. Human Haptic Perception: Basics and Applications, 2008: 513-523.
- [6] DIMA M, HURCOMBE L, WRIGHT M. Touching the past: haptic augmented reality for museum artefacts [M]. Applications of Virtual and Augmented Reality, 2014: 3-14.
- [7] HAKOBYAN L, LUMSDEN J, O' SULLIVAN D, et al. Mobile assistive technologies for the visually impaired[J]. Survey of Ophthalmology, 2013, 58(6): 513-528.
- [8] KOO I M, JUNG K, KOO J C, et al. Development of soft-actuator-based wearable tactile display [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(3): 549-558.
- [9] FREDERIKS A D, KRÖSE B J A, HUISMAN G. Internet of touch: analysis and synthesis of touch across wearable and mobile devices [C]. Proceedings of the ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct, 2016: 273-276.
- [10] TZOVARAS D, NIKOLAKIS G, FERGADIS G, et al. Design and implementation of haptic virtual environments for the training of the visually impaired [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2004, 12(2): 266-278.
- [11] ALBINSSON P A, ZHAI S. High precision touch screen interaction [C]. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2003: 105-112.
- [12] HAKOBYAN L, LUMSDEN J, O' SULLIVAN D, et al. Mobile assistive technologies for the visually impaired[J]. Survey of Ophthalmology, 2013, 58(6): 513-528.
- [13] 喻耀华, 刘正捷, 孙弘进. 触觉显示的人机交互研究及应用[J]. 计算机科学, 2008, 35(11): 28-31.
- YU Y H, LIU Z J, SUN H J. Research and application of haptic display in man-machine interaction[J]. Computer Science, 2008, 35(11): 28-31.
- [14] 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.
- LI J L, SONG AI G, WU J, et al. Research on the method of haptic texture display based on SFS [J]. Journal of Instrument & Instrumentation, 2010, 31(4): 812-817.
- [15] 王鲲鹏. 基于 Otsu 算法和 Sobel 算子的连接件图像边缘检测[J]. 现代计算机, 2011(7): 17-19.
- WANG K P. Linker image edge detection based on Otsu algorithm and sobel operator [J]. Modern computer, 2011(7): 17-19.
- [16] 魏国剑, 侯志强, 李武, 等. 基于边缘差分的运动目标检测方法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(10): 3530-3534.
- WEI G J, HOU ZH Q, LI W, et al. Moving object detection algorithm based on edge subtraction [J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(10): 3530-3534.
- [17] 齐丽娜, 张博, 王战凯. 最大类间方差法在图像处理中的应用[J]. 无线电工程, 2006, 36(7): 25-26.
- QI L N, ZHANG B, WANG ZH K. Application of the OTSU method in image processing [J]. Radio Engineering, 2006, 36(7): 25-26.

作者简介



余玉卿, 2015 年于东南大学获得学士学位, 现为东南大学硕士研究生, 主要研究方向为力触觉再现与人机交互。

E-mail: yqYu93@163.com

Yu Yuqing received her B. Sc. degree in 2015 from Southeast University. Now she is a master graduate in Southeast University. Her main research interests include haptic display and human-computer interaction.



宋爱国(通讯作者), 分别在 1990 年和 1993 年于南京航空航天大学获得学士学位和硕士学位, 1996 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学仪器科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为机器人传感与控制技术。

E-mail: a. g. song@seu. edu. cn

Song Aiguo (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1990 and 1993, respectively, and received his Ph. D. degree from Southeast University in 1996. Now he is a professor and doctoral supervisor in Southeast University. His main research interests include robotic sensor and control technology.