

文章编号:1001-9081(2016)04-1137-04

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.04.1137

面向视频感知的静电力触觉渲染方法

吴赛文, 陈 建, 孙晓颖*

(吉林大学 通信工程学院, 长春 130022)

(* 通信作者电子邮箱 sunxy@jlu.edu.cn)

摘要:针对视觉障碍的人获取视频等数字媒体信息受限的问题,为扩展视频等数字媒体信息的触觉感知通道,提出一种面向视频感知的静电力触觉渲染方法。首先,采用基于像素点的视频帧处理算法,根据手指触摸位置获取当前视频帧的目标像素点,然后将目标像素点彩色信息从RGB模型转换为HSI模型,利用像素点色调分量来映射静电力激励信号频率参量,结合像素点亮度和饱和度分量来映射静电力激励信号幅度参量,合成静电力触觉激励信号,实现对实时视频的触觉渲染和感知。最后,设计动态色彩感知实验和亮度辨识感知实验,结果表明,该方法可实现对视频中物体信息的触觉感知,动态识别平均正确率达90.6%,色彩辨识平均正确率达69.4%,亮度辨识平均正确率达80.0%,所提方法能有效提取视频中的动态特征信息,增强视频触觉渲染的实时性。

关键词:虚拟现实;触觉再现;视频处理;静电力;触觉渲染

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A

Electrostatic force tactile rendering method for video perception

WU Saiwen, CHEN Jian, SUN Xiaoying*

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130022, China)

Abstract: Since the visually impaired person could not enjoy videos and other digital media thoroughly, in order to extend tactile perception channels for video media, an electrostatic force tactile rendering method for video perception was put forward. Firstly, target pixels of the current video frame were acquired according to the location of the finger, and color information of target pixels were transformed from RGB color model to HSI color model. Then the hue parameter of target pixels was used to map stimuli frequencies of electrostatic force, the intensity and saturation parameters of target pixels were used to map stimuli amplitudes of electrostatic force, and the tactile stimuli signal was composited to render the real-time video. Finally, dynamic color perception experiments and identification of brightness perception experiments were designed. The results show that the proposed method can realize to sense the information of objects in the video, the average accuracy of dynamic identification reaches 90.6%, the average accuracy of color identification reaches 69.4%, and the average accuracy of brightness identification reaches 80.0%. The proposed method can extract the dynamic characteristics of video information effectively and enhance the real-time tactile rendering for video.

Key words: virtual reality; haptic display; video processing; electrostatic force; tactile rendering

0 引言

视觉障碍的人由于丧失了视觉,获取信息主要依靠触觉和听觉,触觉是人体除视觉和听觉之外最重要的感觉通道,是人类认识外界环境并与环境进行交互的重要手段^[1]。对于盲人等视觉障碍的人,触觉再现技术可帮助其利用触觉感知方式实现读书、看报、上网、导航^[2-3],但对于图像、视频等数字媒体类信息,目前很难有效感知。如何让视觉障碍的人获得一定程度的数字媒体类信息,是当前研究者们广泛关注的问题^[4]。

图像、视频等数字媒体类信息为视觉信息,要将视觉信息转化为触觉信息呈现,需要建立定量的转换模型^[5]。针对静态图像触觉渲染方法的研究,李佳璐等^[6]用颜色变化表征纹理,提出彩色图像纹理力触觉渲染方法,能够有效地对彩色图

像纹理进行力触觉渲染;Vasudevan 等^[7]提出了一种基于图像处理的纹理力触觉再现模型,该模型提出力渲染掩模的概念,通过子图像与力渲染掩模相乘,有效地对图像的边缘和纹理进行力触觉建模与再现;Adi 等^[8]提出了基于小波变换的方法提取图像中的纹理信息,把图像灰度映射为纹理表面的空间深度信息,建立三维纹理表面模型,完成纹理的力触觉表达。近年来,面向动态视频的触觉渲染方法的研究也逐渐兴起,Cha 等^[9]提出了一种3D视频的触觉感知系统,将触觉信息通过编码方法融入到深度图像中,实现对3D视频的触觉感知;Israr 等^[10]设计了一种针对盲人的视觉-触觉便携辅助设备,通过颜色特征识别环境中的目标物体。上述针对视频的触觉渲染方法,主要集中于编码算法和实践应用方面,而如何提取视频中的触觉特征信息,如何满足视频触觉渲染的实时性,是视频触觉渲染中面临的主要问题。

收稿日期:2015-09-06;修回日期:2015-10-29。 基金项目:国家863计划项目(2013AA013704)。

作者简介:吴赛文(1990—),男,河南郑州人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实、触觉再现; 陈建(1977—),男,山东单县人,副教授,博士,主要研究方向:人机交互、虚拟现实、无线定位; 孙晓颖(1969—),男,吉林公主岭人,教授,博士,主要研究方向:人机交互、触觉再现、无线定位。

静电力触觉再现技术利用静电吸引力原理^[11-12],通过调节手指和触摸屏之间的摩擦力来模拟丰富的触觉感受,可在移动终端上为图像、视频等媒体提供触觉感知接口^[13]。为进一步提高针对视频的触觉感知效果,研究面向视频感知的静电力触觉渲染方法,提出基于像素点的视频帧处理算法,根据手指触摸位置获取当前视频帧的目标像素点,将目标像素点的彩色信息从红、绿、蓝(Red Green Blue, RGB)颜色模型转换为色调、饱和度、强度(Hue Saturation Intensity, HSI)颜色模型,利用像素点色调分量来映射静电力激励信号频率参量,结合像素点亮度和饱和度分量来映射静电力激励信号幅度参量,合成静电力触觉激励信号,实现对实时视频的触觉渲染和感知。

1 静电力触觉再现原理

静电力触觉再现技术通过调节手指和触觉面板之间侧向摩擦力 $f_t(t)$ 来模拟触感^[12],如图1所示,公式表达为:

$$f_t(t) = \mu [f_a + f_e(t)] \quad (1)$$

其中: μ 为手指和触觉面板间的摩擦系数; f_a 是手指施加的压力,一般恒定不变; $f_e(t)$ 为手指和触觉面板之间的静电吸引力。 $f_e(t)$ 的表达式为:

$$f_e(t) = \frac{\epsilon S V^2(t)}{2(T_s/\epsilon_s + T_p/\epsilon_p)(T_s + T_p)} \quad (2)$$

其中: ϵ 为自由空间介电常数, S 为手指接触面积, $V(t)$ 为触觉激励信号, T_s 和 T_p 分别为手指角质层厚度和绝缘薄膜厚度, ϵ_s 和 ϵ_p 分别为手指角质层相对介电常数和绝缘薄膜相对介电常数。 $f_t(t)$ 触觉侧向摩擦力主要取决于静电吸引力 $f_e(t)$ 的变化,静电吸引力 $f_e(t)$ 取决于触觉激励信号 $V(t)$ 的变化。

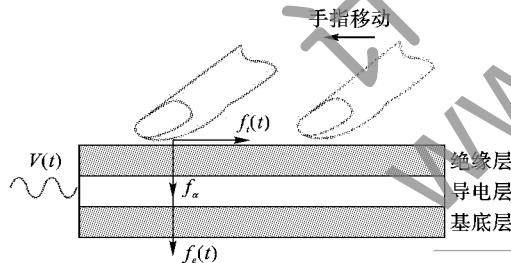


图1 静电力触觉再现力学模型

2 视频触觉渲染方法

视频触觉渲染方法的关键在于既要提取视频的触觉特征信息,又要满足实时性要求。主要分为三个步骤:

- 1) 根据手指触摸位置获取当前时刻视频帧中的目标像素点;
- 2) 将目标像素点的彩色信息从RGB颜色模型转换到HSI颜色模型;
- 3) 根据目标像素点HSI分量进行静电力触觉激励信号参量映射。

2.1 视频帧处理

为满足视频处理的实时性要求,且保证触觉感知的连续性,提出一种基于像素点处理的触觉渲染方法。设置手指触摸位置(取手指触摸区域的中心位置)的物理坐标(F_x, F_y)与视频帧中像素点的相对坐标(x, y)是一一对应的,即

$$\begin{cases} F_x = x \\ F_y = y \end{cases} \quad (3)$$

在 t 时刻视频帧下,手指触摸位置坐标(F_x, F_y)对应该坐标位置的目标像素点为 $P_t(x, y)$ 。

手指触摸视频区域,如图2所示,从A位置滑动到B位置,在 t_i 时刻,检测手指触摸位置,获取该时刻视频帧下手指触摸位置坐标(F_{x_0}, F_{y_0})所对应的目标像素点 $P_{t_i}(x_0, y_0)$,随着手指滑动,在 t_{i+1} 和 t_{i+2} 时刻,依次检测手指触摸位置,分别获取该时刻视频帧下对应手指位置坐标(F_{x_1}, F_{y_1})、(F_{x_2}, F_{y_2})所对应的目标像素点 $P_{t_{i+1}}(x_1, y_1)$ 、 $P_{t_{i+2}}(x_2, y_2)$,利用这些目标像素点映射触觉激励信号。采用这种基于像素点处理的方法,只需获取和处理手指触摸位置的像素点,无需读取和处理整个视频帧,大大提高了视频处理的效率,增强了系统的实时性。

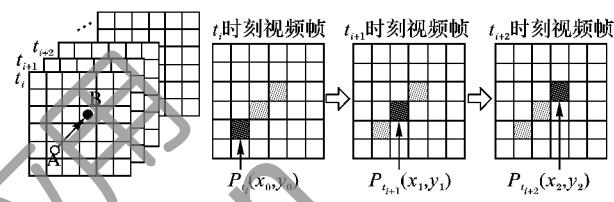


图2 基于像素点的视频帧处理示意图

2.2 触觉特征提取

获取目标像素点后,需要提取其特征信息,用于映射触觉激励信号。对于现实世界中的物体,颜色和亮度是其主要视觉特征,提取视频中物体的颜色和亮度信息来识别和感知物体,需要将目标像素点的彩色信息从RGB彩色模型转换到HSI彩色模型^[14],如图3所示,该模型可将目标像素点值分为色调、饱和度和强度三个分量,用于映射静电力触觉激励信号的频率和幅度参量。

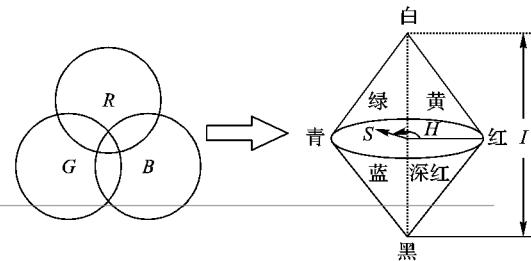


图3 RGB彩色模型与HSI彩色模型转换

将目标像素点的彩色信息由RGB彩色模型转换为HSI彩色模型,公式如下:

$$H = \begin{cases} \theta, & B \leq G \\ 2\pi - \theta, & B > G \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{(R-G)+(R-B)}{2[(R-G)^2+(R-G)(G-B)]^{1/2}} \right\} \quad (5)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)] \quad (6)$$

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (7)$$

色调是描述纯色的属性;饱和度是一种纯色被白光稀释的程度的度量;亮度是一个主观描述子,体现无色的强度概念。捕获3帧摄像头采集的视频,将其转换到HSI彩色模型,彩色视频帧及其各个分量信息如图4所示。

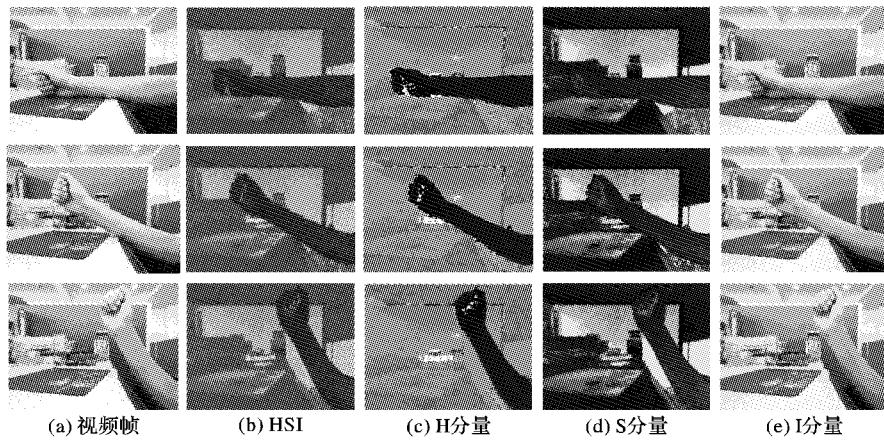


图4 视频帧的HSI模型及各分量

2.3 触觉渲染模型

为模拟触摸视频的触觉感受,获取目标像素点HSI分量信息后,需要建立定量的触觉渲染模型,将目标像素点的HSI分量映射为静电力触觉激励信号。

对于静电力触觉再现系统,触觉激励信号 $V(t)$ 采用正弦波,其信号表达形式为:

$$V(t) = A \cdot \sin(\omega t) \quad (8)$$

不同的激励信号频率 ω 使人产生不同触觉色质感受^[11],不同的激励信号幅度 A 使人产生不同的触觉强度感受^[15]。根据上述的HSI彩色模型,利用目标像素点的色调分量映射激励信号频率,反映物体表面不同的颜色特征;结合目标像素点的亮度和饱和度分量映射激励信号幅度,反映出物体表面的明暗程度和鲜艳程度。

根据韦伯定律以及激励信号频率差别阈值^[11],激励信号频率参量 ω 按照对数分布选取6个特征频率点 ω_0 (50 Hz)、 ω_1 (80 Hz)、 ω_2 (120 Hz)、 ω_3 (180 Hz)、 ω_4 (270 Hz)和 ω_5 (400 Hz)。色调H分量分为红色、黄色、绿色、青色、蓝色和深红6个主色调区间,各个区间宽度为 $\Delta H = \pi/3$;色调分量H与激励信号频率 ω 之间的映射关系如图5所示,表达式为:

$$\omega = \omega_i; i = [H/\Delta H] \quad (9)$$

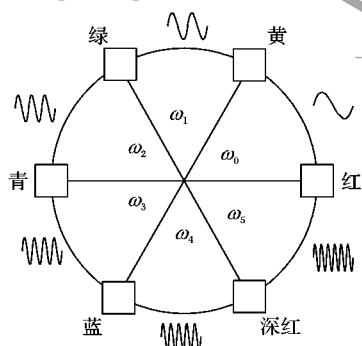


图5 触觉激励信号频率参量映射模型

对于HSI彩色模型,强度分量I表征彩色信息各分量的平均值,饱和度S分量表征彩色信息的纯度和鲜艳程度,在此将强度分量与饱和度分量进行按比例加权相结合,表征物体表面的鲜亮度M,表达式为:

$$M = I(1 + S) \quad (10)$$

由前期实验可知^[13],人体触觉感知强度的对数Y与激励信号幅度的对数X呈线性变化关系:

$$Y = 1.24X - 1.05 \quad (11)$$

将人体触觉感知强度分为100个等级,在此用于映射鲜亮度M,将M归一化为100个等级,Y为归一化后鲜亮度M的对数,X为激励信号幅度A的对数,表达式为:

$$Y = \lg\left(\frac{M - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}} \times 100\right) \quad (12)$$

$$X = \lg A \quad (13)$$

将式(12)~(13)代入式(11)中可得鲜亮度M与激励信号幅度A的映射关系,如图6所示。

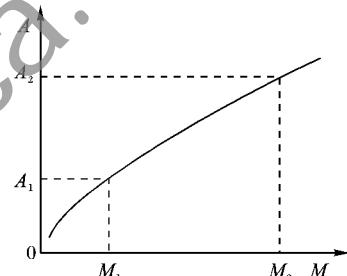


图6 触觉激励信号幅度参量映射模型

根据映射的激励信号的频率和幅度参量,合成静电力触觉激励信号,加载至触觉交互面板,产生相应的触觉刺激,实现人体对视频的触觉感知。

3 实验分析

为验证本文算法的有效性,邀请10名受试者(6男4女)参与实验,平均年龄24岁(最大26岁,最小22岁)。室内温度保持在23℃~28℃,湿度保持在35%~55%。实验系统所用的静电力触觉再现装置如图7所示,采用罗技C930摄像头实时采集视频信息,分辨率为640×480,帧率为30 f/s。触觉交互部分包括三层结构,上层的光学传感器用于获取手指触摸位置信息;中间的触觉再现面板结构类似于电容触摸屏,用于产生静电力触觉刺激;下层的LCD屏幕,用于显示摄像头采集的视频信息。触觉激励信号生成器为程控高压信号生成器,可以产生信号幅度范围为1~400 Vpp,频率范围1~2 000 Hz的正弦波信号。受试者通过导电手环与触觉激励信号生成器共地。

首先,设计动态色彩感知实验,对所提触觉渲染方法的实时性和色彩辨识度进行评测;然后,设计亮度辨识感知实验,对所提触觉渲染方法的鲜亮度辨识性能进行评测。

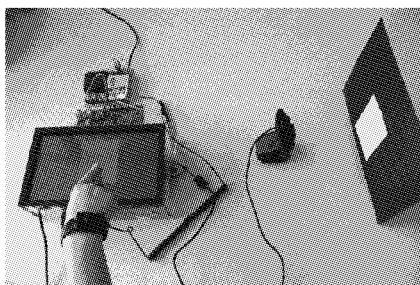


图 7 基于电震动的实时视频触觉再现系统

3.1 动态色彩感知实验

实验步骤:选取红、黄、绿、青、蓝和深红 6 种标准颜色的长方形卡片,每种卡片 3 张,将这 18 张颜色卡片按随机次序排列,实验人员依次抽取其中一张颜色卡片放置在摄像头视频采集区域,每隔 5~10 s 更换一次颜色卡片,更换操作时间为 2~3 s,用眼罩遮挡受试者眼睛,受试者用手指触摸探测视频感知区域,根据触觉感受的有无判断卡片是否更换,并根据触觉感受的差别判断前后两张卡片的颜色是否相同,统计受试者感知到的卡片动态更换和颜色辨别的正确率。

实验结果如表 1 所示,受试者对卡片的动态切换识别平均正确率为 90.6%,标准差为 8.3%;对卡片色彩辨别的平均

正确率为 69.4%,标准差为 9.7%。可看出,大多数受试者可以通过触觉感知识别现实物体的动态变化,且可以辨识不同的颜色,表明本文所提渲染方法实时性强,且颜色辨识度良好。但由于个体差异,受试者对激励信号频率感知差别阈值不同,导致其对相近的颜色分辨不准确;同时,受试者的触觉记忆能力对实验效果产生一定影响。

3.2 亮度辨识感知实验

实验步骤:选取 3 组长方形颜色卡片,每组包括两个卡片,分别是深红色和粉红色、黄色和米黄色、青色和淡青色,已知深红色、黄色和青色的鲜亮度较大。将一组内的两张卡片同时放置在摄像头视频采集区域的左右两边,位置随机调换 3 次,用眼罩遮挡受试者眼睛,受试者用手指触摸感知视频感知区域,根据触觉感受强弱挑选出较为鲜亮的卡片,统计受试者选择的颜色次数,并计算辨识颜色的正确率。

实验结果如表 2 所示,受试者对亮度辨识感知的平均正确率为 80.0%,受试者对深红/粉红和黄色/米黄的鲜亮程度辨识度较高,但对青/淡青的辨识不明显。因为青/淡青卡片易受外界光线的影响,摄像头在采集卡片信息时存在部分颜色失真,导致两种卡片颜色差异不大,使受试者较难区分。

表 1 动态识别与色彩辨别感知实验结果

指标	受试者编号										平均值	标准差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
动态识别正确率	94.4	94.4	100	83.3	72.2	83.3	94.4	88.8	100	94.4	90.6	8.3
色彩辨别正确率	61.1	61.1	88.8	72.2	61.1	61.1	72.2	83.3	61.1	72.2	69.4	9.7

表 2 亮度辨识感知实验结果

颜色组	受试者编号										统计	正确率/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
深红/粉红	2/1	2/1	3/0	3/0	3/0	3/0	3/0	3/0	2/1	3/0	27/3	90.0
黄/米黄	3/0	3/0	3/0	3/0	3/0	3/0	3/0	3/0	3/0	3/0	30/0	100.0
青/淡青	0/3	1/2	2/1	0/3	1/2	2/1	3/0	2/1	3/0	1/2	15/15	50.0

4 结语

本文提出一种新的面向视频感知的静电力触觉渲染方法,为解决视频触觉渲染的实时性问题,提出基于像素点处理的视频帧处理方法,利用视频中目标像素点的 HSI 颜色模型进行触觉渲染,设计一系列实验进行验证评价。实验结果表明,该渲染方法可大大提高视频触觉渲染的效率,满足视频触觉感知的实时性要求,可以帮助受试者实现对不同颜色和亮度物体的动态触觉感知和识别。进一步工作将研究辅助视觉障碍的人通过触觉感知认知真实世界的应用模式,为未来在人机交互中扩展触觉交互通道提供技术参考。

参考文献:

- [1] 王爱民,戴金桥.虚拟现实的力触觉交互技术发展现状与趋势[J].测控技术,2007,26(10):1~3.(WANG A M, DAI J Q. Current development situation & the future trend of haptic interaction in virtual reality[J]. Measurement & Control Technology, 2007, 26 (10):1~3.)
- [2] 王冠生,郑江华,瓦哈甫·哈力克,等.基于 Haptic 技术的盲人路径诱导辅具应用研究现状[J].传感器与微系统,2013,32 (4):1~4.(WANG G S, ZHENG J H, HALIK W, et al. Research status of applications of route guidance aids for the blind based on haptic technology [J]. Transducer & Microsystem Technologies, 2013, 32(4):1~4.)
- [3] XU C, ISRAR A, POUPYREV I, et al. Tactile display for the visually impaired using TeslaTouch[C]// Proceedings of the CHI 2011 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2011: 317~322.
- [4] 吴涓,宋振中,吴伟雄,等.用于盲人的图像振动触觉显示系统设计[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(5):973~977.(WU J, SONG Z Z, WU W X, et al. Design of image vibrotactile display system for the blind [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(5):973~977.)
- [5] 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 A G, LI J Q. Research summarization of image expression with haptic rendering[J]. Application Research of Computers, 2007, 24(5):1~3.)
- [6] 李佳璐,宋爱国,张小瑞.彩色图像的纹理力/触觉渲染方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(4):719~724.(LI J L, SONG A G, ZHANG X R. A method of haptic texture rendering color image[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(4):719~724.)

(下转第 1145 页)

- scribe rigid cloth behavior [C]// Proceedings of the Graphics Interface. Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Information Processing Society, 1996: 147 - 154.
- [3] BARAFF D , WITKIN A . Large steps in cloth simulation [C] // SIGGRAPH 1998: Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1998: 43 - 54.
- [4] BRIDSON R, MARINO S, FEDKIW R. Simulation of clothing with folds and wrinkles [C]// SCA 2003: Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. New York: ACM, 2003: 28 - 36.
- [5] GRINSPUN E, HIRANI A N, DESBRUN M, et al. Discrete shells [C]// SCA 2003: Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. New York: ACM, 2003: 62 - 67.
- [6] VOLINO P , MAGNENAT - THALMANN N . Simple linear bending stiffness in particle systems [C]// SCA 2006: Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. New York: ACM, 2006: 101 - 105.
- [7] PABST S, KRZYWINSKI S, SCHENK A, et al. Seams and bending in cloth simulation [C]// VRIPHYS 2008: Proceedings of the 5th Workshop on Virtual Reality Interactions and Physical Simulations. London: DBLP Computer Science Bibliography, 2008: 31 - 38.
- [8] WONG T H, LEACH G, ZAMBETTA F. Modelling bending behaviour in cloth simulation using hysteresis [J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(8): 183 - 194.
- [9] BESL P J, JAIN R C. Segmentation through variable-order surface fitting [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(2): 167 - 192.
- [10] 李根,潘翔,陈志杨,等.基于泊松形状信号的网格模型部件分割算法[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(12): 2074 - 2079.(LI G, PAN X, CHEN Z Y, et al. Part segmentation algorithm for triangular mesh based on Poisson shape signature[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(12): 2074 - 2079.)
- [11] ZHANG Z X, FENG Y X, I R HAGIWARA. A novel segmentation algorithm for complex 3D mesh model in computer vision [C]// Proceedings of the 2010 IEEE 5th International Conference on Bio-inspired Computing: Theories and Applications. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 869 - 873.
- [12] 隆强.自由曲面造型方法及五坐标数控加工的研究[D].成都:西南交通大学,2012: 27 - 30.(LONG Q. Study on the free from surface modeling and five-axis NC machining of sculptured surface [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 27 - 30.)
- [13] TOPONOGOV V A. Differential geometry of curves and surfaces [J]. Computer Aided Engineering Design, 1976, 2 (4): 273 - 275.
- [14] 丘成桐,孙理察.微分几何讲义[M].北京:高等教育出版社,2011: 253 - 362. (QIU C T, SUN L C. Lectures on Differential Geometry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 253 - 362.)
- [15] 贺强,张树生,白晓亮.曲面特征恢复的三角网格模型孔洞修补算法[J].哈尔滨工业大学学报,2011, 43(11): 120 - 124. (HE Q, ZHANG S S, BAI X L. A hole repairing algorithm based on surface feature recovery in triangular mesh model [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(11): 120 - 124.)
- [16] 齐宝明.三角网格离散曲率估计和Taubin方法改进[D].大连:大连理工大学,2008: 13 - 23.(QI B M. Curvature estimation and the improvement of Taubin's method on triangular mesh [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 13 - 23.)

Background

LI Na, born in 1990, M. S. candidate. Her research interests include virtual reality based on physics.

DING Hui, born in 1977, Ph. D., associate professor. Her research interests include computer vision, digital image processing.

(上接第 1140 页)

- [7] VASUDEVAN H, MANIVANNAN M. Tangible images: runtime generation of haptic textures from images[C]// Haptics 2008: Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 357 - 360.
- [8] ADI W, SULAIMAN S. Haptic texture rendering based on visual texture information: a study to achieve realistic haptic texture rendering [M]// ZAMAN B H, ROBINSON P, PETROU M, et al. Visual Informatics: Bridging Research and Practice, LNCS 5857. Berlin: Springer, 2009: 279 - 287.
- [9] CHA J, EID M, SADDIK A E. Touchable 3D video system[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2009, 5(4): 29.
- [10] ISRAR A, BAU O, KIM S C, et al. Tactile feedback on flat surfaces for the visually impaired[C]// CHI 2012: Proceedings of the Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2012: 1571 - 1576.
- [11] BAU O, POUPYREV I, ISRAR A, et al. TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces[C]// Proceedings of the 23rd Annual Acm Symposium on User Interface Software and Technology. New York: ACM, 2010: 283 - 292.
- [12] KACZMAREK K A, NAMMI K, AGARWAL A K, et al. Polarity effect in electrovibration for tactile display[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(10): 2047 - 2054.

- [13] KIM S C, ISRAR A, POUPYREV I. Tactile rendering of 3D features on touch surfaces [C]// Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New York: ACM, 2013: 531 - 538.
- [14] GONZALEZ R C. Digital Image Processing[M]. Chennai, India: Pearson Education, 2009.
- [15] WIJEKOON D, CECCHINATO M E, HOGGAN E, et al. Electrostatic modulated friction as tactile feedback: intensity perception [M]// ISOKOSKI P, SPRINGARE J. Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication, LNCS 7282. Berlin: Springer, 2012: 613 - 624.

Background

This work is partially supported by the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (2013AA013704).

WU Saiwen, born in 1990, M. S. candidate. His research interests include virtual reality, haptic display.

CHEN Jian, born in 1977, Ph. D., associate professor. His research interests include human-computer interaction, virtual reality, wireless positioning.

SUN Xiaoying, born in 1969, Ph. D., professor. His research interests include human-computer interaction, haptic display, wireless positioning.