

双触点交互的力触觉实时生成方法*

吴新丽¹, 黄欣¹, 张敏雄¹, 杨文珍¹, 潘志庚^{2,3}



¹(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

²(杭州师范大学 数字媒体与人机交互研究中心, 浙江 杭州 311121)

³(广州玖的数码科技有限公司, 广东 广州 510623)

通讯作者: 杨文珍, E-mail: ywz@zstu.edu.cn

摘要: 力触觉的生成和交互有助于提升虚拟环境的沉浸感和真实性. 提出了一种双触点交互的力触觉实时生成方法. 把双触点交互分为 4 种状态, 分别提出不同状态下双触点交互的力触觉实时生成算法, 并建立双触点交互的实验环境, 开展双触点交互力触觉生成的评价研究. 实验结果表明, 该方法能够实时生成双触点交互时的力触觉, 增强虚拟环境的沉浸感和真实性, 提升了人手力触觉交互的自然性.

关键词: 双触点交互; 力触觉生成; 人机交互; 虚拟现实

中文引用格式: 吴新丽, 黄欣, 张敏雄, 杨文珍, 潘志庚. 双触点交互的力触觉实时生成方法. 软件学报, 2018, 29(Suppl. (2)): 120-126. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18023.htm>

英文引用格式: Wu XL, Huang X, Zhang MX, Yang WZ, Pan ZG. Real-Time force generation algorithms based on double-touch interaction. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2018, 29(Suppl. (2)): 120-126 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18023.htm>

Real-Time Force Generation Algorithms Based on Double-Touch Interaction

WU Xin-Li¹, HUANG Xin¹, ZHANG Min-Xiong¹, YANG Wen-Zhen¹, PAN Zhi-Geng^{2,3}

¹(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

²(Digital Media & Interaction Research Center, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

³(Guangzhou NINED Digital Technology Co., Ltd, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Force generation and interaction can improve the immersive and authenticity of the virtual environment, which is an important research direction in the field of human-computer interaction. For the limitation of single-touch force interaction, this study proposes a real-time force generation method based on double-touch interaction. First of all, the double touch interaction is divided into four states. Then, the real-time force generation method of double-touch interaction in different states is proposed. Finally, an experimental environment of double-contact interaction is established to test the proposed method. The evaluation research of force sense generation shows that the method can generate the double-touch force sense in real time, enhance the immersive sense and authenticity of the virtual environment, and improve the naturalness of human hand haptic interaction.

Key words: double touch interaction; force generation; human-computer interaction; virtual reality

虚拟现实系统能够提供视觉、听觉、力触觉等多种感知, 其中, 力触觉的生成和交互能够显著提高虚拟环境的沉浸感和真实性, 广泛应用于教育、娱乐、医疗培训和航天航空训练等领域^[1]. 相对于视听觉的蓬勃发展,

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1004901); 浙江省自然科学基金(LQ19F020012); 浙江省基础公益研究计划(LGF19E050005); 广州创新创业领军团队(CXLJTD-201609); 国家自然科学基金(61332017)

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2018YFB1004901); Zhejiang Natural Science Fund Project (LQ19F020012); Zhejiang Basic Public Welfare Research Project (LGF19E050005); Guangzhou Innovation and Entrepreneur Leading Team Project (CXLJTD-201609); National Natural Science Foundation of China (61332017)

收稿时间: 2018-06-15; 采用时间: 2018-11-08

力触觉交互还存在很多问题有待解决,已成为虚拟现实领域的重要研究方向.

在力触觉生成算法上,Baraff等人^[2]提出了基于单点接触的几何建模计算方法,其几何变形建模计算通过调节控制点或控制网格来改变物体的形状以产生变形效果.Delingette等人^[3]提出了基于隐式积分的物理建模计算方法并应用于手术模拟仿真系统,其物体的形变计算遵从牛顿动力学定律.Wang等人^[4]提出了基于弹簧阻尼骨架球树模型的变形体模拟方法,可以稳定地模拟交互工具和刚体及弹性体混合组织的多区域接力触觉交互过程.Huang等人^[5]运用PHANTOM力反馈设备,开发了一个声触觉仿真系统,将一块织物四边固定,通过力交互设备控制一支刚性笔在虚拟环境中触碰物体.通过外部触觉交互设备和音频设备,用户可以感受到笔在虚拟织物表面上划过时的纹理触觉刺激和摩擦声音.秦聪等人^[6]研发了单触点的虚拟织物力触觉交互系统.该系统能够让用户在接触虚拟织物过程中,既能通过触觉交互设备感受织物的触感,又能在显示器上看到织物的实时形变,实现了单触点的力触觉渲染和交互.上述方法或系统使用的都是单触点力触觉交互,它不仅限制了人们操作物体的自然性,也不利于感知虚拟物体的特性.黄欣等人^[7]研发了双触点的虚拟织物力触觉交互系统,Edin等人^[8]认为,单点触觉交互获取的触觉感知受限是因为物体感知被最小化了.Allerkamp等人^[9]认为,使用1个以上触点,可以增强人在对虚拟环境的感知能力,以便更好地辨别正在操作的对象.为了实现例如虚拟织物的拉伸、夹拢等操作动作,因此,有些学者开始尝试双点或多点的力触觉交互方式,通过研发多点交互的硬件设备,代价比较高昂,且不具备推广性.Shi等人^[10]开发出HAPTEX系统,通过研发一个中间层设备,可以让用户实现拇指和食指同时与虚拟织物之间的交互.当两个手指操作织物时,不对整块织物形变模拟,只对交互发生区域的织物质子位置进行计算更新,仿真该区域形变,避免了大量的计算,系统交互实时性增加,交互变得更加流畅.HAPTEX系统虽然实现了双点操作,但是只能实现小范围内的双指操作,无法实现大范围的操作.另外,一些双触点交互方法是基于自主研发的设备实现,无法应用于市场上已有的触觉交互设备,不具有通用性.

针对上述问题,利用PHANTOM Omni触觉交互设备,本文提出了4种不同状态下双触点交互的力觉实时生成方法,建立双触点交互的实验环境,开展双触点交互力觉生成的评价研究.

1 虚拟物体受力模型

PHANTOM Omni触觉交互设备在虚拟环境中是触点对虚拟物体进行操作,因此,我们先建立了单触点交互的虚拟物体刚柔性混合力模型.

当触点与虚拟物体交互时,虚拟物体的质子受到触点的力作用,可能会产生移动,并通过连接的弹簧带动周边质子移动.弹簧因为质子移动,根据触发条件,长度可能会发生变化,产生对应的弹力反作用于质子.用户操纵触觉交互设备触点作用于虚拟物体的力,称为 \vec{F}_{man} .质子间的阻尼力为 $\vec{F}_{\text{damp}} = -k_d \cdot \vec{v}$,其中, k_d 表示阻尼系数, \vec{v} 为质子移动速度.此外,质子还受到重力作用 $\vec{F}_G = M \cdot \vec{g}$.最后,可得到质子受到的外力为

$$\vec{F}_{\text{ext}} = \vec{F}_{\text{man}} + \vec{F}_{\text{damp}} + \vec{F}_G \quad (1)$$

触点在与质点所在面或面上纹理发生碰撞后,质子会随着触点的移动而移动,其移动触发了相应的弹簧,生成弹簧的弹性应力 \vec{F}_{struct} 、弯曲应力 \vec{F}_{bend} 和剪切应力 \vec{F}_{shear} .此时,弹簧另一端的质点,因为弹簧力的作用,会产生运动.整个模型形成拓扑效应,虚拟物体的每个质子都会因为自身所连的弹簧形变产生力,在空间上进行相应位移.每一个质点同时受到外力 \vec{F}_{ext} 和内力 \vec{F}_{int} ,如图1所示,可由牛顿第二定律建立动力学方程:

$$\vec{F}_{\text{ext}}(i, j) + \vec{F}_{\text{int}}(i, j) = M(i, j) \cdot \vec{a}(i, j) \quad (2)$$

其中, $M(i, j)$ 是质点 $P(i, j)$ 质量, $\vec{a}(i, j)$ 是加速度, $\vec{F}_{\text{ext}}(i, j)$ 对应作用于它的外力, $\vec{F}_{\text{int}}(i, j)$ 是对应模型内力.式(2)即为单触点交互下虚拟物体的刚柔性混合力模型,对于刚性物体,弹簧的虎克系数为无穷大,对于柔性物体,弹簧的虎克系数为有限值.

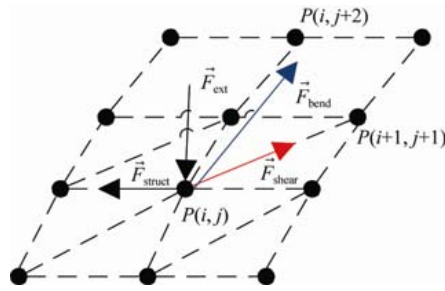


Fig.1 Particle force analysis of virtual objects

图 1 虚拟物体的质点受力分析

2 双触点交互的力觉渲染

双触点的力渲染是指两个触点和虚拟物体间发生接触后,如何计算得到两个触点对应的反馈力,最终传递给用户进行感知.相对于一个触点来说,两个触点可以实现更多动作,对应多种接触状态,因此,需要对接触状态进行归类,并建立对应的力反馈模型进行处理,以达到更逼真的触力觉感知效果.

根据两个触点与虚拟物体三角面片是否碰撞,把两个触点的交互状态分为 4 种情况,如图 2 所示.针对这 4 种情况,分析双触点与虚拟物体的交互状态,并根据交互状态分别建立力生成模型并进行求解.

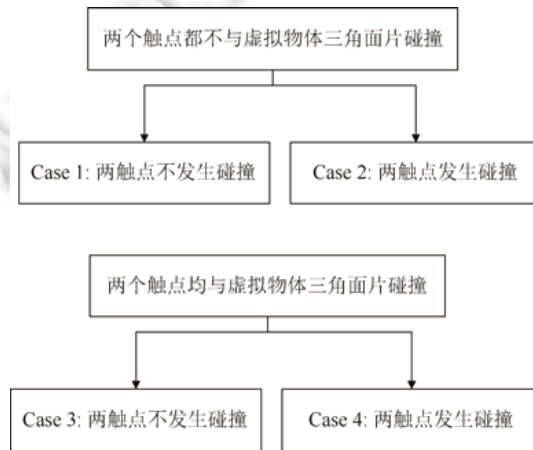


Fig.2 Four states of double-touch interaction

图 2 双触点交互的 4 种状态

2.1 Case 1:两触点均不与虚拟物体接触——双触点不发生碰撞

将一个时间间隔分成先后的时间段 t_1 和 t_2 , P_1 表示触点 1 在 t_1 时间段开始的空间位置, P_2 表示 t_1 时间段结束的空间位置, Q_1 表示触点 2 在 t_2 时间段开始的空间位置, Q_2 表示触点 2 在 t_2 时间段结束的空间位置,两触点在交互过程中没有发生碰撞,并都未与虚拟物体发生碰撞,因此,触点 1 的可视代理点位置为 P_3 和 P_2 重合,触点 2 的可视代理点位置为 Q_3 和 Q_2 重合,两个触点的反馈力都为 0N,如图 3 所示.

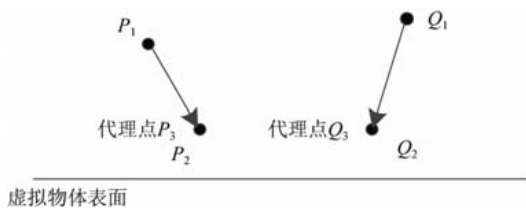


Fig.3 Two HIPs do not touch with the triangular piece of virtual objects, and also do not contact with each other

图3 两个触点不与虚拟物体三角面片碰撞

2.2 Case 2:两触点均不与虚拟物体接触——两触点发生碰撞

将一个时间间隔分成先后的时间段 t_1 和 t_2 , 在 t_1 时间段, 进行触点 1 的交互活动, P_1 为触点 1 在 t_1 时段开始时的位置, P_2 为触点 1 在 t_1 时段结束时的位置, 得到可视代理点 P_3 和 P_2 重合; 进入 t_2 时间段, 进行触点 2 的交互活动, Q_1 为触点 2 在 t_2 时段开始时的位置, Q_2 为触点 2 在 t_2 时段结束时的位置, 触点 2 运动轨迹经过了触点 1 的可视代理点 P_3 位置, 发生碰撞, 因此, 在 P_3 位置生成触点 2 的可视代理点 Q_3 , Q_3 和触点 2 实际位置 Q_2 间的距离 \vec{h} , 为触点 2 对触点 1 的穿刺深度, 触点 2 反馈力为 $\vec{F}_2 = k\vec{h}$, 其中, k 为触点刚性系数, 触点 1 反馈力与触点 2 反馈力互为相反力, 为 $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$; 两个触点均没有与虚拟物体碰撞, 如图 4 所示。

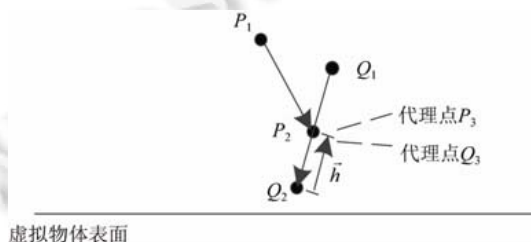


Fig.4 Two HIPs do not touch with the triangular piece of virtual object, but contact with each other

图4 两个触点不与虚拟物体三角面片碰撞但两个触点之间发生碰撞

2.3 Case 3:双触点均与虚拟物体接触——双触点为非接触状态

将一个时间间隔分成先后的时间段 t_1 和 t_2 . t_1 时间段, 进行触点 1 的交互活动, P_1 为触点 1 在 t_1 时段开始时的位置, P_2 为触点 1 在 t_1 时段结束时的位置, 触点 1 从 P_1 运动到 P_2 的过程中会与虚拟物体的三角面片发生碰撞, 运用 God-Object 力触觉渲染算法得到可视代理点 P_3 , 连接 P_2 和 P_3 , 得到穿刺深度 \vec{h}_1 , 与碰撞三角面片法向量一致. 进入 t_2 时间段, 进行触点 2 的交互活动, Q_1 为触点 2 在 t_2 时段开始时的位置, Q_2 为触点 2 在 t_2 时段结束时的位置, 触点 2 从 Q_1 运动到 Q_2 的过程中会与物体表面三角面片发生碰撞, 运用 God-Object 得到可视代理点 Q_3 , 连接 Q_2 和 Q_3 , 得到穿刺深度 \vec{h}_2 , 与碰撞三角面片法向量一致. 如图 5 所示. 触点 1 施加的外力为 $\vec{F}_1 = \vec{F}_{man}$, 触点 1 所受的表面三角面片对其的法向支持力: $\vec{F}_{n1} = k\vec{h}_1$; 触点 1 所受的表面三角面片对其的切向力: $\vec{F}_{t1} = -\mu\vec{F}_{n1}$ (μ 为碰撞表面三角面片的摩擦系数); 触点 2 也只受到表面对其的反馈力: $\vec{F}_2 = \vec{F}_{n2} + \vec{F}_{t2}$; 触点 2 所受的表面三角面片对其的法向支持力: $\vec{F}_{n2} = k\vec{h}_2$; 触点 2 所受的表面三角面片对其的切向力: $\vec{F}_{t2} = -\mu\vec{F}_{n2}$.

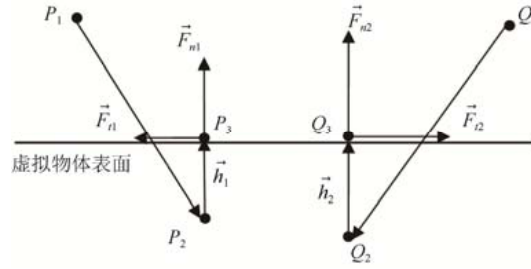


Fig.5 Two HIPs touch with the triangular piece of virtual objects, but do not contact with each other
图5 两个触点均与虚拟物体三角面片碰撞但两个触点之间不发生碰撞

2.4 Case 4: 双触点均与虚拟物体接触——双触点均接触状态

将一个时间间隔分成先后的时间段 t_1 和 t_2 , t_1 时间段, 进行触点 1 的交互活动, P_1 为触点 1 在 t_1 时段开始时的位置, P_2 为触点 1 在 t_1 时段结束时的位置, 触点 1 从 P_1 运动到 P_2 的过程中会与物体表面三角面片发生碰撞, 运用 God-Object 算法得到可视代理点 P_3 , 连接 P_2 和 P_3 , 得到刺穿深度 \vec{h}_1 , 与碰撞三角面片法向量一致; 进入 t_2 时间段, 进行触点 2 的交互活动, Q_1 为触点 2 在 t_2 时段开始时的位置, Q_2 为触点 2 在 t_2 时段结束时的位置, 触点 2 从 Q_1 运动到 Q_2 的过程中会与物体表面三角面片发生碰撞, 运用 God-Object 算法得到可视代理点 Q_3 , 连接 Q_2 和 Q_3 , 得到刺穿深度 \vec{h}_2 度. 图 6 中 A 点为触点 1 从 P_1 位置活动到 P_2 位置时与表面三角面片的碰撞点, 从视觉角度来看, 触点 1 从 P_1 位置活动到可视代理点 P_3 位置, 是先从 P_1 位置移动到碰撞点 A 位置, 发生碰撞后在表面继续移动到 P_3 位置, 形成了触点 1 的可视代理点的移动轨迹 S_1 . B 点为触点 2 从 Q_1 位置活动到 Q_2 位置时与表面三角面片的碰撞点, 从视觉角度来看, 触点 2 从 Q_1 位置活动到可视点 Q_3 位置, 形成了触点 2 的可视点的移动轨迹 S_2 . 在 t_2 时间内, 视觉上, 在触点 2 的可视点在移动过程中, 会与触点 1 的可视点 P_3 发生了碰撞, 此时, 视觉上触点 1 和触点 2 的可视点要同一位置 Q_4 上. 如未与 P_3 碰撞, 触点 2 的可视代理点可以继续移动到 Q_3 , 连接 Q_3 到 Q_4 , 可以得到触点 2 对触点 1 的刺穿深度 \vec{h}_3 ; 根据以上分析, 两个触点均与虚拟物体三角面片碰撞, 且两个触点之间也发生碰撞, 此时, 两个触点的反馈力为情况 2 和情况 3 的反馈力的合力.

$$\vec{F}_{n1} = k\vec{h}_1 \tag{3}$$

$$\vec{F}_{11} = \vec{F}_{n1} + \vec{F}_{t1} \tag{4}$$

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{11} + \vec{F}_{12} \tag{5}$$

触点 1 受到表面对其的反馈力 $\vec{F}_{11} = \vec{F}_{n1} + \vec{F}_{t1}$, $\vec{F}_{n1} = k\vec{h}_1$ 为触点 1 所受的表面三角面片对其的法向支持力, $\vec{F}_{t1} = -\mu\vec{F}_{n1}$ 为触点 1 所受的表面三角面片对其的切向力, 触点 1 还受到了触点 2 对其的碰撞力 $\vec{F}_{12} = -k\vec{h}_3$, 因此, 触点 1 所受反馈力的合力为 $\vec{F}_1 = \vec{F}_{11} + \vec{F}_{12}$; 同理, 触点 2 也所受反馈力的合力 $\vec{F}_2 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{22}$.

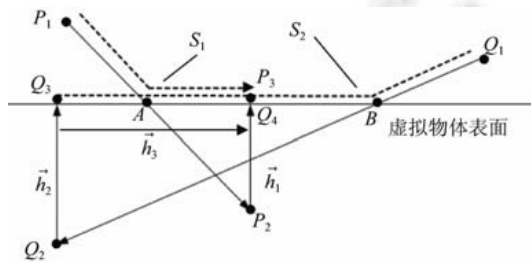


Fig.6 Two HIPs touch with the triangular piece of virtual objects, and also contact with each other
图6 两触点均与虚拟物体三角面片碰撞且两个触点之间也发生碰撞

根据以上分析, 两个触点均与虚拟物体三角面片碰撞, 且两个触点之间也发生碰撞, 此时, 两个触点的反馈力为情况 2 和情况 3 的反馈力的合力.

3 双触点交互系统实验评价

3.1 系统实现

在对虚拟环境进行了初步渲染之后,主要创建触点和虚拟织物.本文在空间 X-Z 平面绘制织物,由 25×25 个质子组成,纹理图像大小为 97 像素×97 像素,对应纹理表面由 97×97 个纹理点重构而成.为了方便观察形变和感受反馈力,设定织物四边固定不动,织物关于坐标原点对称.然后,为视觉模型增加视觉物理属性,例如光照等,为触觉模型增加力学物理属性,例如质子质量、弹簧弹性系数、表面摩擦系数等.

3.2 双触点虚拟织物交互测试实验

双触点虚拟织物交互测试实验,即测试织物在两指尖进行触摸时的应力仿真情况.如前文所述,虚拟织物在虚拟空间内呈四边固定悬空状态,在交互测试过程中,为了保证织物力反馈的稳定性,本文主要采取双指尖触压织物、双指尖钩提织物以及一压一提织物 3 种状态的织物应力形变,如图 7 所示.



Fig.7 Fabric stress deformation

图 7 织物应力形变

可以得到图 7 中 3 幅图对应交互操作下,织物平衡状态下提供的反馈力的大小,每个状态保持 5s,每秒读取 33 次反馈力数值,具体数据见表 1.表中提供的每秒的反馈力数值为 1s 内 33 次反馈力数值加权得到,以三维矢量方式分 x,y,z 方向以数值形式记录,见表 1.

Table 1 Force value under different contact conditions

表 1 不同接触状态下触觉力的大小

时间(s)			1	2	3	4	5
两指按压	\vec{F}_1 (左)	x	-0.14	-0.15	-0.21	-0.24	-0.17
		y	1.74	1.68	1.67	1.75	1.79
		z	0.73	0.74	0.77	0.78	0.69
	\vec{F}_2 (右)	x	0.08	0.08	0.07	0.06	0.07
		y	1.23	1.21	1.17	1.18	1.19
		z	0.57	0.56	0.53	0.56	0.54
两指提拉	\vec{F}_1 (左)	x	-0.05	-0.03	-0.01	-0.01	-0.04
		y	-1.97	-1.95	-1.92	-1.93	-1.94
		z	-1.12	-1.11	-1.07	-1.08	-1.09
	\vec{F}_2 (右)	x	-0.20	-0.25	-0.29	-0.27	-0.24
		y	-1.87	-1.86	-1.89	-1.85	-1.82
		z	-0.97	-0.97	-1.04	-1.02	-0.97
一指按,一指提	\vec{F}_1 (左)	x	-0.29	-0.26	-0.25	-0.27	-0.26
		y	2.34	2.32	2.34	2.29	2.31
		z	0.92	0.93	0.97	0.93	0.96
	\vec{F}_2 (右)	x	-0.16	-0.18	-0.17	-0.20	-0.22
		y	-2.62	-2.67	-2.66	-2.62	-2.59
		z	-1.32	-1.37	-1.34	-1.34	-1.30

通过对数据进行分析,可以发现,在两个 HIP 和织物保持相对静止状态期间,力反馈数值与平均值间的波动是极小的,考虑到人手输出力的自然抖动,结果说明织物力反馈模型和织物形变模型的实时稳定性.

4 结 语

针对单触点力觉交互的局限性,本文提出了一种基于双触点交互的力觉实时生成方法.首先,对双触点与虚

拟物体的接触状态进行了分类,并根据分类建立了相应的力生成模型;然后,建立双触点虚拟人机交互系统,实现类双手指的操作效果,并开展双触点交互力觉生成的测试实验,实验结果表明,该方法能够实时生成双触点的力觉反馈,提高了力触觉交互的真实性.本文的方法还存在一些不足,比如在本文系统实现过程中,首先需要构建一定大小的虚拟织物,然后将纹理图片匹配于其上,如果虚拟织物综合比与纹理图片不一致,则需要对纹理图片进行处理,这些问题将来还需要进一步研究.

References:

- [1] Wang DX, Jiao J, Zhang YR, Zhao XH. Computer haptics: Haptic modeling and rendering in virtual reality environments. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016,28(6):881-884 (in Chinese with English abstract).
- [2] Baraff D. Analytical methods for dynamic simulation of nonpenetrating rigid bodies. *Computer Graphics*, 1989,23(3):223-232.
- [3] Delingette H, Subsol G, Cotin S, *et al.* A craniofacial surgery simulation testbed. *Visualization in Biomedical Computing*, 1994, 2359(1):607-618.
- [4] Wang D, Shi Y, Liu S, *et al.* Haptic simulation of organ deformation and hybrid contacts in dental operations. *IEEE Trans. on Haptics*, 2014,7(1):48-60.
- [5] Huang G, Metaxas D, Govindaraj M. Feel the "Fabric": An audio-haptic interface. In: *Proc. of the Euro Graphics SIGGRAPH Symp. on Computer Animation*. 2003. 52-60.
- [6] Qing C. Simulation of virtual fabric handle and deformation [MS. Thesis]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [7] Huang X, Yang WZ, Wu XL, Di W, Zhu ZC. Virtual fabric haptic rendering with double haptic interactive points. *Journal of System Simulation*, 2014,26(9):1997-2002 (in Chinese with English abstract).
- [8] Alessandro P, Edin B, Panarese A. Human ability to discriminate direction of three dimensional force stimuli applied to the finger pad. *Journal of Neurophysiol*, 2011,105:541-547.
- [9] Böttcher G, Allerkamp D, Glöckner D, Wolter FE. Haptic two-finger contact with textiles. *The Visual Computer: Int'l Journal of Computer Graphics*, 2008,24(10):911-922.
- [10] Wen S, Shahram P. A feasibility study of levels-of-detail in point-based haptic rendering. In: Isokoski P, Springare J, eds. *Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication*. LNCS 7282, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 493-504.

附中文参考文献:

- [1] 王党校,焦健,张玉茹,赵晓含.计算机触觉:虚拟现实环境的力触觉建模和生成. *计算机辅助设计与图形学学报*,2016,28(6): 881-884.
- [6] 秦聪.虚拟织物的手感生成和变形模拟[硕士学位论文].杭州:浙江理工大学,2013.
- [7] 黄欣,杨文珍,吴新丽,邸伟,竺志超.双触点虚拟织物触觉交互,系统仿真学报,2014,26(9):1997-2002.



吴新丽(1987—),女,浙江桐乡人,博士生,讲师,主要研究领域为虚拟现实技术.



杨文珍(1976—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为虚拟现实技术.



黄欣(1989—),男,工程师,主要研究领域为虚拟现实技术.



潘志庚(1965—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为虚拟现实技术.



张敏雄(1995—),男,硕士生,主要研究领域为虚拟现实技术.