

计算机触觉：虚拟现实环境的力触觉建模和生成

王党校, 焦 健, 张玉茹, 赵晓含

(北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室 北京 100191)
(hapticwang@buaa.edu.cn)

摘 要: 触觉是人类 5 种感觉通道之一, 在日常生活中发挥着不可缺少的作用. 在虚拟现实和增强现实系统中, 力触觉反馈的引入有望显著提高人机交互的沉浸感和交互性. 文中综述了虚拟现实环境中力触觉感受的建模和生成方法, 从力触觉生成与视觉生成的差异性出发, 回顾了计算机触觉的发展历史和国内外研究现状, 重点分析了虚拟物体建模、碰撞检测、碰撞响应、变形计算等关键技术, 并提出了力触觉生成技术的未来发展趋势和技术挑战.

关键词: 计算机触觉; 虚拟现实; 力触觉建模; 力触觉生成; 人机交互
中图法分类号: TP391.41

Computer Haptics: Haptic Modeling and Rendering in Virtual Reality Environments

Wang Dangxiao, Jiao Jian, Zhang Yuru, and Zhao Xiaohan

(State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: The haptic channel is one of the five sensory channels of human. It plays an indispensable role in everyday life. In the virtual reality and augmented reality systems, the haptic feedback is expected to significantly improve immersion and interactivity of human-computer interaction (HCI). This paper reviews the haptic modeling and rendering technologies in virtual reality environments. From the perspective of the haptic and visual rendering differences, we summarize the history and current situation of research in the haptic field, and analyze the key technology of virtual object modeling, collision detection, collision response, force/torque computation and so on. Finally, we propose trends and future research challenges in haptic rendering.

Key words: computer haptics; virtual reality; haptic modeling; haptic rendering; human-computer interaction

触觉是人类 5 种感觉通道之首, 也被誉为人的感觉之母, 是人类与外部世界进行信息交互的基本渠道. 通过触觉通道可以感知来自于外界的硬度、温度、形状、表面纹理等重要信息. 逼真的虚拟现实(virtual reality, VR)系统应具有 3 个本质特征——沉浸感、交互性和想象性(immersion, imagination, interaction, 3I), 这三方面一直是 VR 技术发展和前进的主要目标. 当前的 VR 系统一般只

只具备视觉和听觉这两方面的信息功能, 而由于在触/力觉方面的显示能力不足, 因此导致了 VR 系统的交互性不够. 力触觉人机交互对于保证虚拟现实系统的 3I 特性具有不可或缺的地位, 其作用在于通过视听触多感觉融合增强沉浸感、通过人与虚拟环境的双向交流增强交互性、通过“所见即所触”提供更加丰富多彩的仿真应用. 正如计算机图形学(computer graphics)在 20 世纪 60 年代的孕育

收稿日期: 2016-04-30; 修回日期: 2016-05-09. 基金项目: 国家自然科学基金(61170187, 61572055). 王党校(1976—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究方向为计算机触觉、触觉生理学; 焦 健(1985—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为触觉人机交互、机器人学; 张玉茹(1959—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为触觉人机交互、机器人学; 赵晓含(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机触觉.

和发展一样, 计算机触觉(computer haptics)正在 VR 系统中扮演越来越重要的角色^[1-3].

力触觉人机交互系统由操作者、力触觉设备、力触觉生成算法三部分组成. 力触觉人机交互是操作者通过交互设备向虚拟环境输入力或运动信号, 虚拟环境以视、听、力或运动信号的形式反馈给操作者的过程^[4]. 力触觉生成算法(haptic rendering)是计算和生成人与虚拟物体交互力的过程^[5-7], 是力触觉人机交互技术的软件核心, 是使人感受到虚拟环境丰富多彩的关键.

力触觉(haptic)包括人体 2 类感受器: 位于皮肤真皮层和表皮层的触觉感受器(tactile receptor), 相应诱发的感受称为触觉反馈; 位于关节和韧带内的感受器(kinesthetic receptor), 相应诱发的感受称为力觉反馈. 为模拟这 2 类感受, 相应的生成方法分别称为力觉生成(force rendering)和触觉生成(tactile rendering)方法^[8].

相比于视听觉的蓬勃发展, 触觉交互的研究仍存在很多问题有待解决. 导致触觉研究进展缓慢的原因在于力触觉研究的多学科交叉特点, 涵盖计算机科学、机械学、自动控制、心理学、认知神经科学等学科. 对力触觉人机交互技术的研究将推动这些学科的发展, 研究成果也必将促进学术领域的发展. 从人类力触觉感知机理到力触觉交互技术还有很多基础性的问题在探索之中, 力触觉人机交互领域是有望诞生原创基础研究成果的新领域.

2008 年, 国际顶级期刊《Nature》上发表的一篇题为“big data: the next Google”的文章中列举了未来 10 年可能改变世界的十大技术, 其中排在第 2 位的就是力触觉人机交互技术^[9]. 力触觉人机交互技术有广泛应用前景, 应用领域包括虚拟手术、航空航天产品设计和维护、肢体关节康复、遥操作和微纳机器人、娱乐和体感游戏等.

与视听觉人机交互相比, 力触觉交互的难点在于如何营造一个具有高实时性(1 kHz 更新频率)、高逼真度(建模和仿真误差小于人的力触觉感知阈值)的虚拟环境, 模拟再现自然界中物体间接触时的丰富多样力学属性, 并保证人-机-虚拟环境回路的稳定性.

力触觉生成与图形绘制渲染的区别在于: 实时图形渲染的刷新频率为 30 Hz, 而实时力触觉渲染要求刷新频率至少在 1 kHz 以上^[10]; 图形显示是计算机呈现给人的单向的信号流动, 而力触觉是人机

之间的闭环信号和能量交互, 因此图形渲染只需要保证视觉逼真性即可, 而力触觉渲染对计算模型在稳定性和逼真性都提出了更严格的要求^[11]. 触/力觉交互系统相当于人类作为一个环节参与的闭环反馈系统, 操作者通过控制一个由机械和电子设备组成的系统(力觉交互设备)与计算机内部的虚拟环境进行信息交互, 并使操作者体验到信息交互的真实感. 不正确的计算模型会导致虚拟环境的输出信号与力觉交互设备的力学特性不匹配, 不仅会导致用户的触觉体验不真实, 甚至会造成触/力觉反馈设备出现强烈的震动和异响等不稳定现象, 严重时致使虚拟设备受到破坏, 甚至对操作者造成伤害^[12]. 因此, 在触/力觉渲染算法的设计的过程中必须考虑到设计的稳定性和安全性, 同时必须保证操作者体验到设备的真实感, 即要兼顾设备的逼真性、实时性和稳定性等三方面特点. 因为触/力觉显示必须符合人与外部物体交互的客观规律, 才能保证操作者能够感觉到来自于外部世界的真实感. 因此, 建立力学模型使操作者感觉到来自于物体的真实感, 并且又能满足系统的稳定性和快速性, 是力触觉合成和渲染方法面临的巨大挑战.

1 力觉生成技术发展历史

力觉生成算法的发展可以归结为力反馈设备的技术推动和力觉反馈应用的需求拉动两方面. 虽然力反馈设备在 1950 年已经用在核环境的废料主从操作控制中^[13], 但力觉生成算法的研究并未得到重视. 直到 1994 年, 以 Massie 等^[14]发明的 Phantom 力反馈设备的问世为驱动, 掀起了面向桌面式力反馈设备的力觉生成算法的研究热潮. 早期研究(1994—2003 年)的主流是三自由度(3-DoF)力觉生成算法, 其原理是将手持设备的虚拟空间化身(avatar)作为一个点来表示, 该点具有三维运动, 可以和虚拟环境的物体接触交互产生三维作用力, 并将三维作用力通过力觉交互设备反馈给操作者, 从而使操作者体验到借助于力反馈设备的 stylus 与虚拟物体交互的逼真感受. 由于不同应用领域需求牵引, 各类 3-DoF 力觉生成算法得到研究, 包括刚体、弹性体、流体、变拓扑力觉交互等. 经典算法包括 god-object, virtual proxy, ray casting 等^[14-16]. 显而易见, 3-DoF 力觉生成算法不能模拟物体之间的多点接触感受, 当工具化身和物体多点接触时会出现穿透障碍物

的结果, 极大地损失了交互逼真度. 此外, 3-DoF 力觉生成算法无法模拟物体之间的交互力矩, 造成了力觉感受的不完整.

随着各类桌面式六自由度力觉反馈设备的问世^[17-19], 以及模拟复杂场景的逼真力觉交互需求, 1999 年, Mcneely 等^[10]首次提出了六自由度(6-DoF)力觉生成的概念, 其目标是解决复杂形状物体多点多区域不穿透接触交互模拟, 以及刚体交互的六维力和力矩联合计算问题. 由于不同应用领域需求牵引, 各类 6-DoF 力觉生成算法得到广泛研究, 用在刚体、弹性体、流体、变拓扑交互等方面. 2008 年, Lin 等^[20]联合 10 余位触觉领域知名学者, 编著了第一本系统化综述力触觉合成研究现状的著作, 标志着 6-DoF 力觉生成研究进入了新阶段. 直至今日, 6-DoF 力觉生成算法仍然是研究热点, 很多问题有待解决.

2 国内外研究现状

2.1 总体架构

由于控制模式的差异, 力反馈设备分为阻抗控制和导纳控制 2 类^[21-22]. 阻抗式力反馈设备的输入信号为虚拟工具的位置和姿态变量, 输出为虚拟工具受到的虚拟环境内障碍物的反作用力; 导纳式力反馈设备则将操作者与虚拟环境之间的作用力作为控制器的输入, 根据接触点的理想阻抗模型, 计算设备在受此作用力情况下的理想位置作为输出. 本文以前者为例介绍力觉生成方法的计算框架和主要步骤, 后者的细节可以参考文献^[23-25].

力觉生成方法的计算框架分为 2 种方法: 直接渲染方法, 虚拟匹配方法^[26]. 如图 1 所示, 前者将力反馈设备的位置和姿态变化直接映射到虚拟工具的位置和姿态变化; 后者指力反馈设备和虚拟工具之间通过一个虚拟弹簧和阻尼元件联系, 将虚拟工具的运动看作外力和内力联合作用的刚体运动, 采用牛顿力学来求解, 外力指力觉设备的牵引力(coupling force), 内力指障碍物对工具化身的反作用力(contact force). 后者的优势在于将虚拟环境内的 6-DOF 运动-力非线性映射采用一个线性的弹簧阻尼环节来“短路”, 通过限制该环境的弹簧和阻尼上限小于力反馈设备的阻抗边界, 从而保证了力觉交互设备的稳定性.

2 类力觉生成方法的计算流水线如图 1 所示, 输入为力觉反馈设备的三维或六维位置和姿态变

化, 按照固定的采样频率(一般为 1 kHz)输入力觉生成方法. 力觉生成流水线内部计算步骤包括: 虚拟物体建模(离线)、碰撞检测、碰撞响应(工具响应、被操作物体响应)、交互力计算等. 流水线外部模块包括与视觉合成模块的通讯和协调.

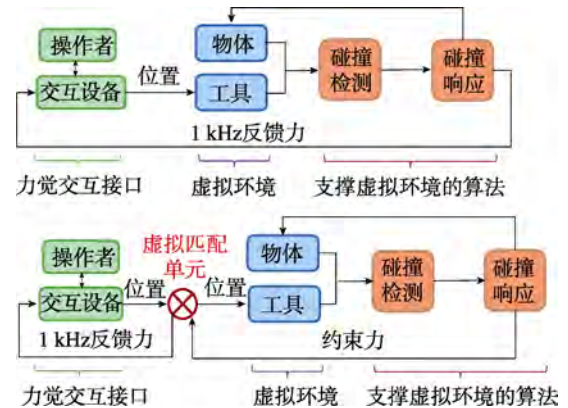


图 1 直接渲染和虚拟匹配 2 种架构的流水线^[27]

2.2 建模方法

建立模型指在虚拟环境中建立交互工具和被操作物体的几何表达和物理表达^[28], 前者在计算几何、计算机辅助设计和计算机图形学领域得到广泛研究, 后者在弹性力学、计算力学等领域得到广泛研究. 力触觉生成方法中建模的难点在于如何平衡模型精细度和 1 kHz 计算效率之间的关系.

不同于计算机图形学建模, 在力触觉交互技术中, 力触觉生成建模需要研究物体的外在几何属性和内在的物理属性的集成建模方式, 包括物体属性的数据获取和数字模型建立等过程. 典型的数据获取方法是通过 CT 断层扫描、激光扫描或计算机视觉技术对物体的三维外形进行测量, 并获取物体的三维形态数据, 然后再对其进行三维重构. 把模拟对象的物理属性等参数添加到计算机图形学中, 如物体的内部组织黏度、表面硬度、摩擦系数等参数, 并且要保证数据结构的高效率, 为后续 1 kHz 运算提供保障.

力触觉生成的代表性模型包括点集合模型、三角网格模型、体素模型、球树模型、点壳模型、NURBS 曲面模型等. 在设计力觉生成算法时, 应根据应用需求的不同来进行模型选择.

网格模型是应用最早也是最广泛的模型. Zilles 等^[29]在 1995 年提出了将计算机图形学中的网格模型应用到力触觉领域的思想, 通过采用点、线、面这 3 种几何元素, 以及它们之间的拓扑关系来表示三维实体表面, 如图 2a 所示. 网格模型的优点主要

在于表面网格细腻有很好的显示效果,可用于虚拟模型的显示;缺点是在细节渲染时,网格模型极易导致力觉渲染的穿透效应,可能造成错误的力反馈效果^[30].基于三角网格的性能优势,通用型商用力觉生成开发环境如 Open Haptics^[5],Chai^[31]采用的是三角片网格形式对虚拟物体的几何外形进行表达,并通过虚拟弹簧和虚拟阻尼的物理模型来表达真实物体的物理属性.

体素模型是将整个空间完全分割成相同尺寸和姿态、且相互不重叠的立方体以便于后序处理.体模型最突出的优点是碰撞检测和其他求交测试简单,只需要检测对应的坐标位置的数值即可.因此该方法不仅可以方便地表示物体的几何属性,也能扩展到表示其他属性.Mcneely等^[10]以点壳(point shell)模型作为虚拟工具,体素(voxel-based)模型作为虚拟物体,可以进行快速力觉生成运算,实现了六自由度的力觉生成.如图 2b 所示,Barbic等^[32]将体素模型的思想与距离场结合,与点壳模型结合成功模拟了复杂物体之间的弹性体力交互.此外,体素的优势在于容易支持变拓扑结构的操作,如钻削等材料去除操作的模拟.Morris等^[33]就采用体素模型进行骨骼钻削的模拟.

Hubbard^[34]提出将球树模型应用在力触觉领域,以球为基元组合逼近的球树模型来表示虚拟工具和虚拟物体,如图 2c 所示.球树模型的优点在于球的各

向均匀,对球做碰撞检测和空间约束时只需要计算比较球的半径与球心距离,可提高复杂特征物体的碰撞检测效率.Wang等^[35-36]将球树模型和约束优化方法结合,提出复杂形状物体之间多区域接触的 6DoF 力觉生成方法,实现了刚体、变形体、物体尖锐和细节特征可保持等力觉仿真要求.

Li等^[37]采用样条曲面进行力渲染,研究了单点与 NURBS 曲面接触交互、NURBS 曲面与 NURBS 曲面间多点的交互^[38].

模型将影响后续的物体细节表达精度、碰撞检测方法的效率、模型更新的难易程度,对于力觉生成方法具有全局性的影响.正是由于特点各异,因而根据具体应用特点选择合适的几何模型是提高力觉生成算法性能的关键.

2.3 碰撞检测

碰撞检测实时检测虚拟工具与虚拟环境中的其他物体是否产生接触,并对工具与物体之间的接触点位置、接触方向、接触面积、穿透深度和穿透体积等参数进行检测计算,为后续碰撞响应计算提高准确的接触状态信息.碰撞检测难点是适应不同凹凸复杂几何形状,要求元素级(例如面片级)精确检测,是保证 1 kHz 刷新频率的关键.此外,由于虚拟工具的运动受用户实时控制,其运动速度和运动方向事先不可预测,由交互设备实时采集得到,碰撞检测要避免工具快速运动的误检测,

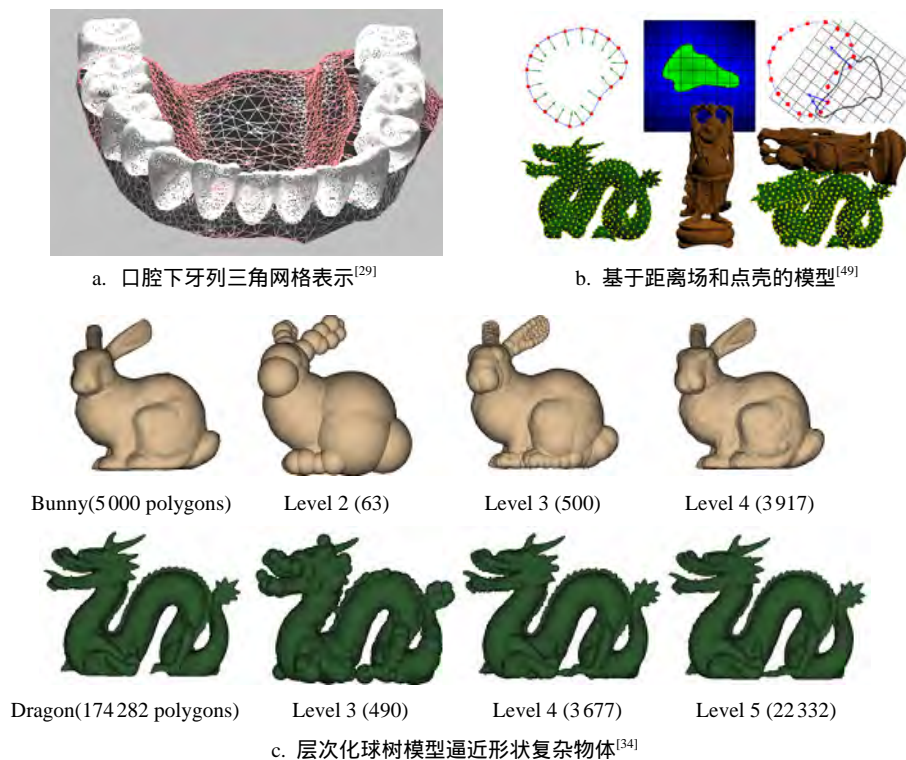


图 2 力触觉生成的代表性模型表达方法

尤其是针对薄壁物体或物体上的细微几何细节操作时, 容易出现工具穿透现象。

碰撞检测分为接近度检测和穿透量检测, 按照精度要求可以分为离散和连续碰撞检测。为加快计算效率, 一般采用粗检测和精检测 2 个阶段。前者采用物体的包围盒与运动工具进行检测, 后者要定位到物体上的元素级精度^[20]。

Gottschalk^[39]提出了层次化包围盒并用于对冲突的快速检测, 层次包围盒法是按照空间距离对物体的组成单元递归地划分, 直到每个包围盒只包含一个基本组成单元为止; 其优点是碰撞检测从包围盒树状结构顶层开始遍历, 避免了不必要的基本单元之间的测试, 可有效地提高碰撞检测的精度, 能够保证系统的真实性。因此, 可用于对精度要求较高的模型检测过程。此外, 空间分割法是对包含物体的空间进行单元划分, 碰撞检测只需判断对应的网格空间是否包含空间单元。空间网格划分法也是碰撞检测的常用方法, 其优点是可有效地提高检测效率和速度, 缺点是检测的相对精度不高, 因此可用于对速度有很高要求的模型检测中。

一些共享软件开发包可用于力觉生成的碰撞检测, 包括 PQP(proximity query package), SWIFT++等。PQP 功能包括狭义的碰撞检测、最近距离计算、距离阈值验证。SWIFT++功能包括狭义的碰撞检测、距离阈值验证、近似和精确最小距离计算、碰撞验证^[40]。其他开源工具还有 SOLID, COLDET 等, 更多介绍可参考 UNC gamma 图形学实验室网站^[41]。此外, FAST 支持刚体的连续碰撞检测, 即给定刚体的起止位形, FAST 能计算出碰撞第一次发生的时刻, 以及该时刻的具体的碰撞几何信息^[42]。C2A 支持刚体的连续碰撞检测, 不要求拓扑结构信息^[43]。这些碰撞检测算法大多基于网格模型, 而且适用场合、计算效率各异。

为协调对象复杂度和碰撞检测技术效率的矛盾, 基于多分辨率模型的碰撞检测方法得到广泛研究。典型方法是层次细节(level-of-detail, LOD)简化法, 主要有 2 种方法: 一种是静态构造离线 LOD 模型, 另一种是动态构造连续 LOD 模型, 后者一般是通过渐进式的网格方式实现的。El-Sana 等^[44]首先将多分辨率方法引入到力觉渲染领域, 把虚拟环境中探针附近的区域应用细网格进行划分, 而在探针以外的区域采用粗网格。Ostaduy 等^[45]针对人类对细节感知的理论研制了凸面片的网格模型简化方法, 并根据真实的牙齿模型构建出了多分辨率的牙齿模型, 如图 3 所示; 该方法实现了实时稳定的力觉渲染, 但由于采用离散 LOD 模型, 不支持渐进式的传输方式, 因此不适合应用于内存空间有限的力触觉渲染环境。Yoon 等^[46]构建了一系列的动态 LOD 渐进式网格, 并使用 OBB 包围盒加速碰撞检测, 但很难获取详细的接触信息。Liu 等^[47]提出了一种“局部细分”方法, 用以满足力触觉生成对快速碰撞检测的要求, 准确的碰撞检测发生在局部细分的网格上。Zhang^[48]提出了在粗糙的网格模型上对感兴趣的区域进行细分的方法, 通过控制三维模型的网格的节点数目来调和柔软物体变形时对反馈力的计算要求, 以及解决快速与图形显示要求计算细节的矛盾, 能够确保模拟的高效率进行。Pavel 等^[49]把探查速度作为多分辨率模型之间切换的条件, 通过归并树数据结构对多分辨率的交互模型进行构造; 但其缺点在于数据结构比较繁杂, 因而算法的稳定性难以保证。Barbic 等^[32]基于距离场模型进行多分辨率碰撞检测, 有效地实现了变形体的力觉渲染。

2.4 碰撞响应

图 4 所示为 Lin 等^[20]给出的 6DoF 力觉合成的通用计算框架, 其中包含 2 个核心问题: 工具位置姿态(T)的求解、力和力矩(F)的计算。前者即是本节讨论

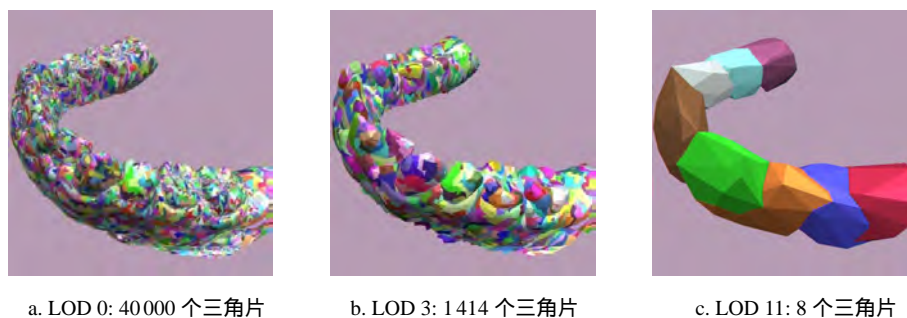


图 3 基于网格的多分辨率层级模型^[45]

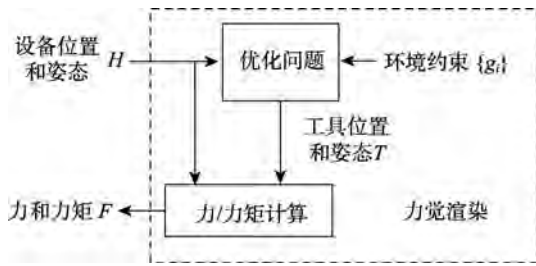


图 4 6-DOF 力觉合成的通用计算框架^[20]

的碰撞响应，其含义是在碰撞检测模块检测到物理工具和障碍物发生碰撞或穿透后，基于物体之间的物理约束特性，求解图形工具的位置姿态(T)。

碰撞响应的难点主要在于同时满足快速求解和力觉交互稳定性的条件。图 5 所示为对 6-DoF 力觉合成中碰撞响应方法的分类：基于惩罚的方法(penalty-based method)和基于约束的方法(constraint-based method)、基于冲击的方法(impulse-based method)。下面对 3 种具有不同特点的响应方法的优缺点以及适用范围进行介绍。

基于惩罚的方法将虚拟工具(图形工具)的移动和转动加速度作为待求状态变量，通过建立牛顿力学微分方程组，采用隐式积分实现动力学方程解算。将工具与物体的相对嵌入深度映射为接触力，通过接触分簇方法来实现多点约束下的接触力合成^[50]。由于数值积分环节引入计算误差，该方法不适合于模拟狭小空间的力觉交互；此外，该方法没有考虑工具运动的历史信息，由于采用当前时刻的嵌入深度来计算惩罚约束力，存在计算歧义，因此当物理工具上多个点嵌入物体时，在物理工具的微小运动(尤其是转动)输入下不可避免地产生约束力计算结果的突变，必须借助于虚拟匹配方法来实现装置输出力的连续变化，损失了模拟的精度。Mcneely 等^[51]对惩罚方法进行了改进，基于

point-shell 和 voxel-maps(VPS)相结合描述刚体接触交互，基于静力平衡方程来计算碰撞响应。Barbic 等^[32]将该方法进一步改进，通过距离场和层次化点壳模型实现了实时的力和变形计算。Seth^[52]使用点壳体素方法(VPS)来研究基于力觉反馈的装配，以检查装配路径的可行性。研究表明，采用体素模型无法装配那些配合间隙比较小(≤ 0.5 mm)的零部件。

在上述基于惩罚的方法中，由于接触点位置或法线的跳变会带来力矩的跳变，导致出现力觉和视觉感受的不一致性，包括图形工具与物体相互穿透、或存在间隙时却出现反馈力、不真实的摩擦和黏滞效果等，影响了力觉模拟的真实感。

基于惩罚的方法是一种近似和局部的方法，与之相比，基于约束的方法是精确的和全局的方法^[20]。针对基于惩罚的动力学模型的缺点，Ortega 等^[53]提出了基于约束的计算方法，采用准静态运动优化和连续碰撞检测实现响应计算。该方法不需要依赖于虚拟匹配即可实现物体之间的多点接触交互稳定性，但其采用加速度作为优化的设计变量，需要通过 2 次数值积分得到工具的位置和姿态，因此仍然存在数值积分带来的误差问题；此外，由于该方法采用连续碰撞检测算法，不能处理滑动接触下的约束识别问题，尤其是跨越尖锐特征时的约束识别问题，因此会导致优化算法失效。Zhang 等^[54]针对机器人路径规划的机器人与障碍的避碰需求，提出了广义的嵌入距离概念，通过在位型空间来建立约束优化问题来求解广义嵌入距离，实现 2 个刚体的无嵌套的位型计算，该思想对于 6DOF 碰撞响应有借鉴价值。除了采用优化模型，还有的方法是采用牛顿力学和线性互补问题(linear complementarity problem, LCP)方法求解碰撞响应。Duriez

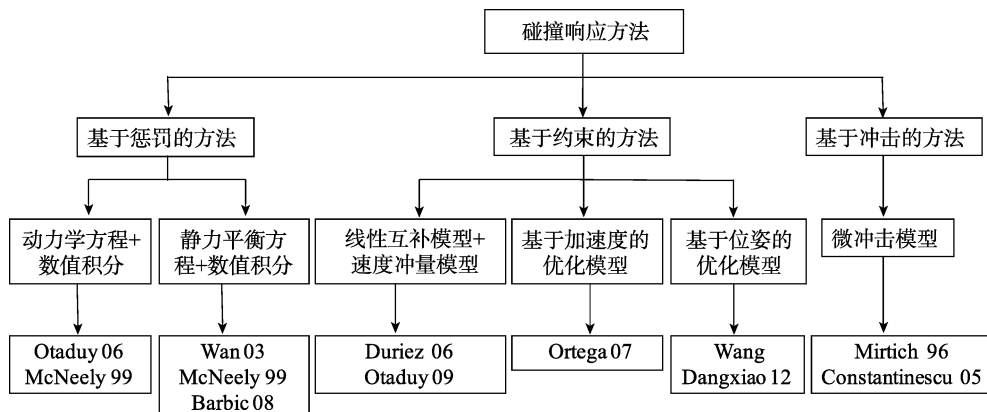


图 5 6-DoF 力觉合成中碰撞响应的研究方法分类^[50]

等^[55]提出局部线性化接触模型, 实现了快速的接触状态建模和变形计算等. 这些方法没有考虑不同组织的硬度差异带来的交互力突变问题. Baraff^[56]提出采用 LCP 模型来描述接触状态, 但是引入摩擦力时可能存在无解的情况.

为了提高六自由度力觉合成的逼真性, Wang 等^[57-59]提出了基于运动工具六维位姿变量优化的多点接接触觉合成方法, 基于 medial-axis tree 层次球树进行非嵌入单边接触约束建模, 模拟了复杂形状物体之间的单边不可嵌入约束(如图 6 所示), 保证了约束描述的普适性; 提出快速迭代优化求解算法, 实现了可保持细节特征的六自由度实时力觉渲染. 该方法避免了经典惩罚方法的误差, 也减小了经典约束方法的计算耗时(碰撞响应刷新频率从 100Hz 提高到 1kHz), 稳定模拟了复杂多点接触和频繁约束状态切换的力觉交互过程, 如图 7 所示.

基于冲击的方法将运动物体和静止物体之间的接触状态区分为分离和冲击接触 2 种状态, 而持续的接触状态则被看作一系列微小冲击的序列^[60]. 这种方法适合于模拟频繁冲击的交互任务, 对于存在持续接触的任务的计算效率不高^[61]. 尚未见到针对该方法应用于 6DoF 问题的深入研究.

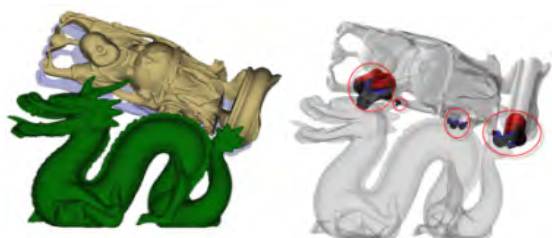


图 6 复杂形状物体之间的多点多区域接触单边约束^[57]

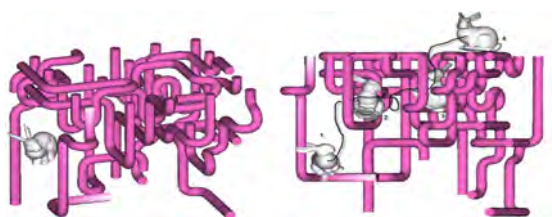


图 7 复杂多点接触和频繁约束状态切换的交互过程^[59]

2.5 力模型

基于碰撞检测的结果, 计算手术工具和被操作物体之间的作用力通常采用 2 类方法: 基于几何的方法和基于物理的方法. 前者中的交互力主要考虑物体和交互工具的几何外形和物体之间相对嵌入深度或嵌入体积的影响; 后者包括弹簧质量

模型、有限元模型等.

在力和力矩的计算架构中有 2 种方法: 基于直接合成架构的惩罚力计算模型^[62], 基于虚拟匹配架构的虚拟匹配力计算模型. 后者又可以细分为 2 类: 静态模型^[10,32]、基于速度的动态模型^[50,63]. 在基于直接合成架构的惩罚力计算模型中, 直接将惩罚力作为反馈力输出给交互设备, 这种方式难以保证力觉交互的稳定性, 因为接触点位置或法线的跳变往往会带来力和力矩的跳变, 在多点接触交互中这种跳变更容易出现^[62]. 为此, Otaduy 等^[50]采用虚拟匹配(virtual coupling)来计算发送给设备的反馈力, 并引入了一个线性化接触模型实现动力学仿真和碰撞检测的解耦, 以保证力觉合成的高刷新频率. 与此类似, Barbic 等^[32]采用准静态的虚拟匹配模型来计算反馈力和力矩, 这些方法保证了系统的稳定性, 但牺牲了逼真性. Ortega 等^[53]基于碰撞响应的计算结果, 即根据虚拟工具(图形工具)运动的约束加速度和自由加速度, 基于一个近似弹簧模型求解反馈力和力矩. 上述方法仅模拟了正压力, 摩擦力/力矩的模拟是一个难点. 例如, 在 LCP 方法中, 加入摩擦效应后会导致动力学方程组无解^[56]. 当碰撞响应采用优化方法时, 摩擦力/力矩将改变约束空间的形态; 当碰撞响应采用牛顿力学方程和数值积分时, 摩擦力/力矩的引入将产生微分-代数联立方程, 导致求解的难度大大增加^[20].

变形计算通过对弹性体的建模计算来改变物体的形状以产生变形效果, 其难点在于力传递过程太过复杂导致计算烦琐影响变形的运算效率. 变形计算涉及的是对模型的变形程度计算并显示数据的过程. Baraff^[56]提出了基于单点接触的几何建模计算方法, 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, 其优点是计算效率相对较高, 变形方式完全取决于设计者灵活性强; 缺点是由于模型简单, 显示效果稍差. 因此, 该方法更适用于强调快速性的变形计算过程. Delingette 等^[63]提出了基于隐式积分的物理建模计算方法并应用于模拟手术仿真系统, 物理变形计算指物体的变形遵从牛顿动力学定律等物理规律. 该方法的优点是可以根据不同物体的物理性质对变形进行真实模拟, 而且可以实现更加逼真的变形效果; 缺点是物理变形方法, 特别是有限元变形方法的计算量非常大、实时性较差, 且积分方法的选取会极大地影响变形的效果. 因此该方法更适用于强调逼真性的变形计算过程. Wang 等^[64]提出了基于弹簧阻尼骨架球树模型的

变形体模拟方法(如图 8 所示),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(如图 9 所示),计算效率保持在 1 kHz 以上。

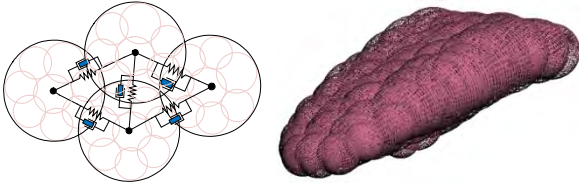


图 8 基于弹簧阻尼骨架球树模型的变形体模拟^[64]

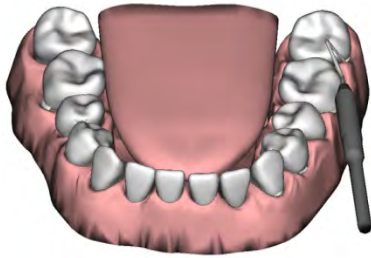


图 9 工具与刚体和弹性体同时接触的力觉合成^[64]

当交互的形式涉及到物体的内部结构(如切割、钻削)时,基于几何的力计算很难做出令人满意的逼真效果,这样的情形下,必须在一定层度上考虑物理规律。最初的思路是借鉴于计算机图形学研究中常用的模型驱动的思路,即从交互所处的学科中寻找相应的理论模型,对其进行改良(主要是考虑计算快速性),然后通过实验调整模型的参数,应用到实时交互的系统中去。在对近似刚性的生理组织(如骨骼、牙齿等)的钻削和切割模拟方面,Agus 等^[65]提出一种基于腐蚀的材料去除模型,结合这种材料去除模型,采用基于嵌入体积的方式进行反馈力的计算,并通过测量系统对该方法所计算的力的逼真性进行了验证。针对牙体预备中的力计算,Liu 等^[66-67]设计了测量装置,用于采集医生在加工离体牙时牙体所受到的力,从而得出一个近似的力计算模型。在弹性体的探查以及包括切割的模拟方面,Pai 等^[68]提出了通过测量来进行力觉渲染的思想,并提出了模型选择、测量、参数估计和实时渲染 4 个步骤的物理建模思路,设计了带位置和力传感器的机械臂对真实变形物体的物理属性(变形与受力的关系)进行扫描式测量。Okamura 等^[69]采用一个自由度的机械臂带动针对动物肝脏进行穿刺操作,通过机械臂的载荷计算受力,利用图像估算操作速度,从而建立针对生理组织的手术力模型;并采用类似方法建立了手术剪刀进行剪切时的力模型。Hover 等^[70]介绍了数据驱动的力觉生成方法,通过采集刚性探针和黏弹

性刚体和黏性流体的力觉交互的力和位移数据,基于多个弹簧和阻尼并联的 Maxwell 模型构建了力觉计算的插值域维度,包括工具位置、运动速度、速度的低通滤波值,以及工具尖端的减速度。基于这 4 类参数,采用多重调和样条作为径向基函数进行力场插值计算的交互力可以模拟材料应力释放等瞬态效应。如图 10 所示,针对 4 类材料(硅胶、橡皮、蜂蜜和硅油)的实验结果表明,力觉模拟逼真度小于人的力觉可分辨阈值。



图 10 4 类黏弹性材料^[70]

令人可喜的是,我国学者在力触觉生成方法和计算模型研究方面开展了大量研究^[71-79],与国际同行研究工作相比,我们的研究深度和原创性亟待提高。

3 发展趋势

3.1 大规模场景力觉交互

大规模场景力觉交互指交互工具的虚拟化身需要在具有大量虚拟物体的场景中漫游和执行交互操作,交互工具和被操作物体产生大数量的接触区域和接触点,产生复杂的接触状态以及约束力的频繁转换,这种操作任务将导致现有的力觉生成方法的计算效率难以满足 1 kHz 的要求。一个典型领域是工业操作环境中复杂设备的虚拟维修任务。图 11a 中,波音公司模拟了飞机仪器舱的力反馈虚拟装配场景,用户将一个形状复杂的虚拟工具(虚拟茶壶)在大量刚性体管道和柔性体电缆中移动,需要到达指定的操作部位。据报道,波音飞机舱内布线用电缆数量为 30 km,且安装间隙小,工具的微小尺度运动将导致接触状态的频繁变化,因此需要精确快速的碰撞检测算法,以及稳定的力和力矩计算模型。类似例子有如图 11b 所示的波音公司的飞机起落架虚拟拆装维护任务^[51]、图 11c 所示的北京航空航天大学研制的飞机发动机虚拟装配、汽车关键零件装配等。

此类问题模拟难度在于:具有大规模数量级

数据(虚拟物体的三角片数量在千万级以上, 导致参与物理计算的单元数目在十万级以上); 接触区域数目(工具和物体可能产生上百个接触区域, 对于约束求解的效率造成极大挑战); 力的类型多样性(存在法向力、摩擦力、冲击力、弯曲力矩、扭转力矩等); 交互运动的不可预测范围变化(工具运动尺度范围大、运动精度要求高、运动轨迹不可预测)。目前的力觉合成算法仅能模拟十万以内的元素规模, 同时接触的元素对在一百以内, 而且主要处理静态环境交互, 不能处理物体拓扑结构变化的实时计算要求。

3.2 生物组织复杂交互行为模拟

近年来, 由于虚拟手术等需求推动, 生物组织的复杂力觉交互行为的模拟成为研究热点, 包括人体组织器官非线性非均质物理属性建模、刚性手术器械与骨骼肌肉脏器等刚柔混合组织的多点接力触觉合成^[80](如图 12 所示)、复杂交互行为如腹腔镜手术的切割打结缝合等力觉交互仿真(如图 13 所示); 无穷多自由度柔性手术器械(如心脏介入手术导管)和人体血管壁和内部血液流体的流固耦合对象的接触交互^[80](如图 14 所示)、个性化病变组织

(如牙石和牙龈发炎后细腻力觉感受的模拟等)^[81](如图 15 所示)。

为达到上述目标, 需要深入认识待模拟物体的几何结构、物理及生理特性。为保证操作者对生物组织特性的细节感知和可信渲染, 力触觉生成算法需要着重研究如何提高模拟精细度和准确性。

3.3 从力觉生成到力触觉融合生成

由于力触觉硬件设备的技术进步以及新型掌上移动和穿戴式交互应用的发展需求, 力触觉生成方法已经和正在经历 4 个发展阶段: 力觉生成(force rendering)、触觉生成(tactile rendering)、力触觉融合(haptic rendering)和穿戴式力触觉融合(wearable haptic rendering)。

由于智能手机的计算能力增长和普适娱乐应用需求推动, 如何能够使得用户触摸移动终端, 例如手机屏幕内的虚拟物体成为研究热点。以美国 Immersion 公司、韩国 LG 公司、Microsoft 亚洲研究院、Disney 研究院为代表, 面向平板设备的触摸反馈技术成为近年(2005—2015 年)来研究热点^[82]。从支持单点触摸的触觉反馈到多点触觉反馈, 从高频压电振动产生挤压空气膜效应(如图 16a 所示)到

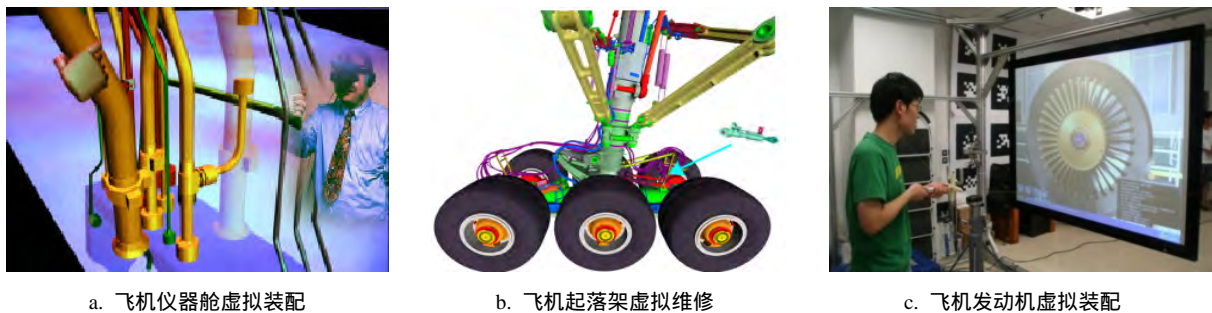


图 11 复杂场景力觉生成实例^[51]



图 12 骨骼肌肉脏器混合组织多点接力触觉合成^[80]



图 14 心脏介入手术柔性导管和人体血管交互^[80]



图 13 腹腔镜手术打结缝合力反馈模拟^[80]

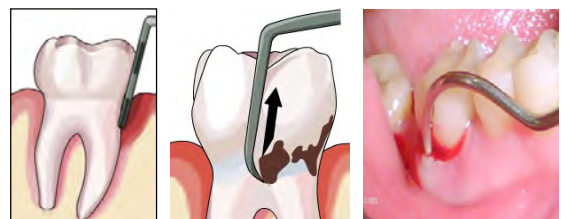


图 15 口腔手术细节病变组织力反馈模拟^[81]

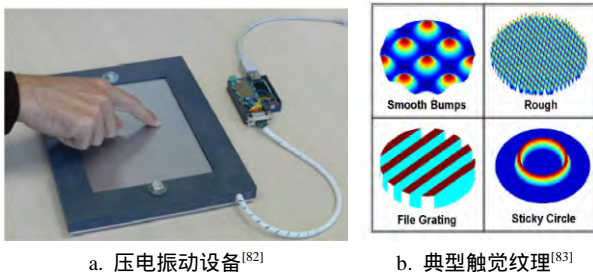


图 16 触觉反馈

静电吸附效应, 出现了不同的触觉反馈合成方法, 图 16b 所示为模拟的几种典型的物体表面纹理^[83-84]. 如何通过手指运动跟踪和表面纹理的实时生成实现时空配准, 是触觉合成的主要研究内容. 直接接触交互行为的触觉渲染模拟需要考虑皮肤变形对于细节触觉感受的影响, 将在电子购物等领域具有广泛应用价值.

近年来的研究难点是如何将力觉和触觉反馈的感受有机结合, 研制力触觉反馈一体化设备和相应的合成方法, 使得用户体验到两者的无缝融合. 进一步, 面向穿戴式全身力触觉交互设备, 研究相应的力触觉生成方法.

Perez 等^[85]提出一种 tactile rendering 算法用在穿戴式触觉反馈设备上, 如图 17 所示, 该设备的一个面板和人手直接接触, 但接触点位置和接触方向可实时调整; 通过建立优化模型来求解设备平板的位姿, 逼近虚拟世界中手指和物体的接触面, 通过实时调整设备刺激的接触面方向和接触点位置, 给用户产生之间触摸的感觉体验. 该方法的创新在于考虑到手指的弹性非线性变形对接触面的影响.



图 17 用在穿戴式触觉反馈设备的 tactile rendering 算法^[85]

Provancher 等^[86]将手指皮肤变形等效为摩擦力, 如图 18 所示, 利用 PHANToM 力反馈设备模拟手指与虚拟表面间的正压力和摩擦力; 同时在力反馈设备的操作末端安装了一个接触位置模拟装置(contact location display)来产生手指皮肤变形. 接触位置模拟装置是一个由电机驱动的半圆形橡胶滑块(曲率半径约为 1 cm), 在使用时安装在用户手臂的电机将拖动滑块沿手指表面切向运动造成

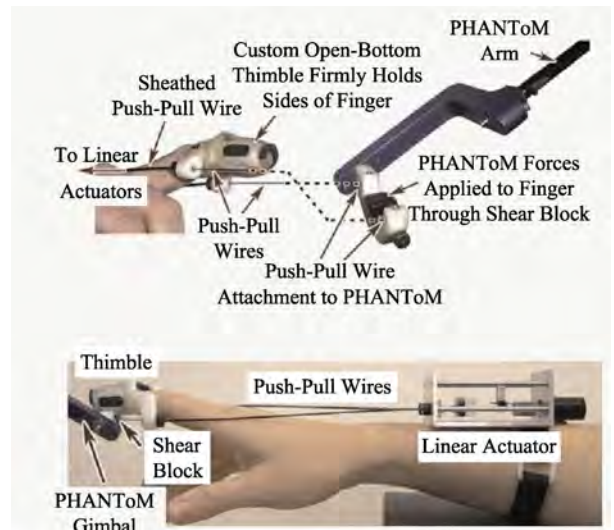


图 18 力觉触觉融合显示设备^[86]

皮肤变形.

近年来, 具有整手力触觉反馈能力的硬件设备推动着整手力触觉合成方法的研究. Otaduy 等^[11]提出穿戴式触觉交互生成算法, 如图 19 所示, 用来模拟抓持弹性虚拟物体时的力觉感受, 该模型考虑了手指多关节骨骼结构运动和手指肌肉局部变形对于抓持力反馈的影响, 进一步, 该模型可用于双手协调操作的力反馈精细操作模拟.



图 19 虚拟手多点交互的穿戴式触觉交互生成算法^[11]

3.4 开发标准库建设

正如计算机图形学的蓬勃发展推动了 OpenGL 和 Direct3D 等图形绘制和渲染库, 力触觉生成的产业化和大规模工业应用也离不开开发标准库和共享资源库的建设. 表 1 所示为现有的力觉生成开发库, 但还远未达到标准化, 不便于虚拟现实开发人员的快速二次开发以满足不同领域应用力觉交互需求.

Culbertson 等^[87-89]提出触觉照相(haptography)的概念, 研制了手持式力觉测量装置, 如图 20 所示, 可以测量人手持工具划过平板表面的压力、摩擦力、振动信号、滑动速度等信息; 并提出了分段自回归

表 1 力觉生成开发库

开发库	提出者	功能	局限
Open Haptics	Geomagic (Sensable)	提供 HL 和 HD 2 种开发模式, 便于初学者和专家级开发者建立力觉交互场景	仅支持 3DoF 力觉合成; 仅具有初步的变形体交互功能
CHAI 3D	Force Dimension	基于 C++ 库, 集成图形绘制和触觉实时仿真的开放源码软件, 支持诸多商业版力觉反馈设备	集成难度大, 要求使用者熟练掌握 C++; 且涉及到复杂的矩阵操作和专业数学知识
H3D	SenseGraphics	支持网页格式力反馈交互场景开发	仅提供 Sensable 设备连接接口, 无法和其他设备集成
SOFA	INRIA	手术模拟的通用平台, 支持力觉反馈计算的基本功能	仅提供 Haption 设备连接接口, 无法和其他力反馈设备集成

模型(autoregressive model)拟合出振动加速度和压力、滑动速度之间的映射模型. 进一步, 基于该装置, 测量了十大类(纸张、金属、碳纤维、织物、塑料、木质、石头、泡沫、瓷砖和地毯)、100 个不同纹理物体力觉交互过程的数据(如图 21 所示), 包括振动(加速度)、滑动速度、压力、摩擦力等参数. 基于该数据, 用户可以手持一个力反馈设备 Phantom 来触摸虚拟场景中的球, 可以赋予球的各类测量数据库中的纹理触摸感受(如图 22 所示). 但是, 触觉交互资源库的规模和材质类型还远不能满足各类应用的需求.

3.5 新型应用开发

技术的发展与应用的推动相辅相成. 力触觉生成方法的发展动力来自于新型应用的推动, 触觉交互呼唤着“杀手级”应用需求.

Raya 等^[90]将力觉反应用于探查一个具有超过 8 000 个分支的果蝇丝状神经结构, 操作者控制的工具被简化成一个球并被约束在丝状结构内运动, 借助力反馈, 操作者可以被导航至预期路径(如图 23a 所示). Corenthy 等^[91]在对人脑 CT 数据进行特征分析时, 将工具的运动约束在等值面上并加以力反馈, 可以增强操作者对大脑特征的认识(如图 23b 所示). 此外, Sensable 公司开发了系列交互设备 Phantom 和相关软件 FreeForm, 辅助艺术家进行虚拟雕刻, 以方便从毛坯开始设计, 为数字化设计提供了自然、

高效的实现途径^[92]. Immersion 公司开发力觉交互设备 FeelIt 力反馈鼠标和 CyberTouch/Grasp/Force 系列力反馈数据手套, 可以方便地集成到游戏软件中, 为增强游戏逼真度和趣味性提供了极富潜力的途径^[93]. Wang 等^[81]研制了口腔手术模拟器(如图 24 所示), 用于手眼协调和双手配合的口腔手术力反馈操作训练, 在北京大学口腔医学院开展了上百名医生用户评测实验, 为力觉生成方法的改进提供了大量医学数据.

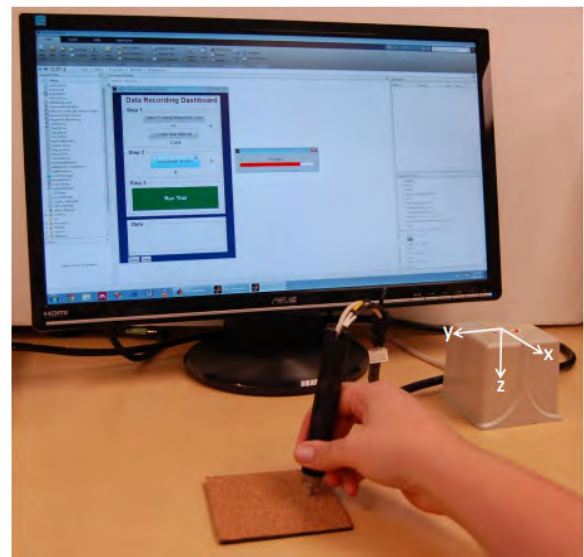


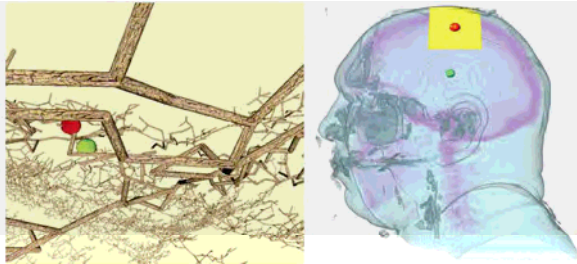
图 20 手持式力觉测量装置^[87]



图 21 力觉素材库中的十大类材质^[88]



图 22 通过力反馈设备来触摸不同材质的虚拟球^[89]



a. 丝状神经结构导航^[90]

b. 基于 CT 数据的人脑分析^[91]

图 23 复杂生理结构的力觉交互



图 24 手眼协调双手配合口腔手术精细操作
力反馈应用场景^[81]

4 总结与展望

力触觉人机交互技术研究涉及计算机科学、心理学、认知科学、神经科学、机械学, 以及控制、计算机等学科, 研究难度大. 经过 30 多年的研究, 仍然存在很多难题有待解决. 力触觉生成理论和技术的突破有赖于对人类力触觉感知机理的深入理解、新型力触觉反馈设备的推动和新型的力触觉交互应用的驱动.

展望未来, 若干研究方向值得关注. 从面向大规模复杂场景的力觉生成、人体组织复杂交互行为的力觉生成逼真度, 力触觉融合生成方法, 到力触觉交互开发标准的研究, 以及新型应用的开发, 有望产生突破.

1965 年, Sutherland 教授提出“终极显示”的概念, 其中阐述了力触觉反馈的重要性, 50 多年后的

今天, 力觉交互仍然没有达到理想效果. 对图形图像逼真度的不懈追求成就了计算机图形学的迅猛发展, 对力触觉交互逼真度的持续需求也将促进力触觉交互技术的进步, 促成未来的“终极显示”的实现.

参考文献(References):

- [1] Cameron C, Park J K, Beim D. Human-computer interaction experiments in an immersive virtual reality environment for e-learning applications[J]. Shanxi Architecture, 2014, 93(5): 1820-1870
- [2] Englmeier K H, Krapichler C, Haubner M, *et al.* Virtual reality and multimedia human-computer interaction in medicine[C] //Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Multimedia Signal. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1998: 193-202
- [3] Wang Chengwei, Gao Wen, Wang Xingren, *et al.* Lingjing (virtual reality) technology theory and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996(in Chinese)
(汪成为, 高文, 王行仁, 等. 灵境(虚拟现实)技术的理论、实现及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996)
- [4] Hayward V. Haptic Interfaces and Devices[J]. Sensor Review, 2004, 24(1): 16-29
- [5] Salisbury K, Brock D, Massie T, *et al.* haptic rendering: programming touch interaction with virtual objects[C] //Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics. New York: ACM Press, 1995: 123-130
- [6] Wang D, Shi Y, Liu S, *et al.* The influence of handle-avatar mapping uncertainty on torque fidelity of 6-DOF haptic rendering[C] //Proceedings of IEEE World Haptics Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 325-330
- [7] Wu J, Leung Y S, Wang C C L, *et al.* Smooth force rendering on coarse polygonal meshes[J]. Computer Animation & Virtual Worlds, 2010, 21(3/4): 235-244
- [8] Wang D, Xiao J, Zhang Y. Haptic rendering for simulation of fine manipulation[M]. Heidelberg: Springer, 2014
- [9] Buxton B, Hayward V, Pearson I, *et al.* Big data: the next google[J]. Nature, 2008, 455: 8-9
- [10] Mcneely W, Puterbaugh K, Troy J. Six degrees-of-freedom haptic rendering using voxel sampling[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1999: 401-408
- [11] Otaduy M A, Garre C, Lin M C. Representations and algorithms for force-feedback display[C] //Proceedings of IEEE Computer. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013, 101: 2068-2080
- [12] Wang Dangxiao. Research on haptic display technology in virtual reality dental training system[D]. Beijing: Beihang University, 2004(in Chinese)
(王党校. 牙科手术模拟的力觉交互仿真方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004)
- [13] Witzig W F, Stuart M R, Herwig L O. Computational and experimental techniques in nuclear reactor design[J]. Communication & Electronics, 1959, 78(2): 155-163

- [14] Massie T H, Salisbury J K. The PHANToM Haptic Interface: a device for probing virtual objects[C] //Proceedings of IEEE Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1994: 295-301
- [15] Ruspini D C, Kolarov K, Khatib O. The haptic display of complex graphical environments[C] //Proceedings of Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques, New York: ACM Press, 1997: 345-352
- [16] Srinivasan M A, Basdogan C. Haptics in virtual environments: taxonomy, research status, and challenges[J]. *Computers & Graphics*, 1997, 21(4): 393-404
- [17] Geomagic. Control geomagic touch & haptics[OL]. [2016-04-30]. <http://www.geomagic.com/zh/>
- [18] Haptic device. Force dimension-home[OL]. [2016-04-30]. <http://www.forcedimension.com/>
- [19] Actualités. Présentation au sia lab [OL]. [2016-04-30]. <http://www.haption.com/>
- [20] Lin M C, Otaduy M, Lin M C, *et al.* Haptic rendering: foundations, algorithms and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008
- [21] Bowyer S A, Davies B L, Ferdinando R Y B. Active constraints/virtual fixtures: a survey[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(1): 138-157
- [22] Salisbury K, Conti F, Barbagli F. Haptics rendering: introductory concepts[J]. *Computer Graphics & Applications*, 2004, 24(2): 24-32
- [23] Shi Jiancheng, Liu Jianhua, Ning Ruxin, *et al.* Haptic rendering technology based on admittance control in virtual assembly[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(2): 227-235(in Chinese)
(史建成, 刘检华, 宁汝新, 等. 虚拟装配中基于导纳控制的力觉渲染技术[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, 24(2): 227-235)
- [24] Van D L R Q, Lammertse P, Frederiksen E, *et al.* The haptic master, a new high-performance haptic interface[C] //Proceedings of International Conference on Eurohaptics. London: Eurohaptics Association Press, 2002: 1-5
- [25] Faulring E L, Lynch K M, Colgate J E, *et al.* Haptic display of constrained dynamic systems via admittance displays[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(1): 101-111
- [26] Colgate J E, Schenkel G G. Passivity of a class of sampled-data systems: application to haptic interfaces[C] //Proceedings of IEEE American Control Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1994: 37-47
- [27] Wu Jun. Haptic rendering algorithms for dental simulation[D]. Beijing: Beihang University, 2011(in Chinese)
(吴俊. 牙科手术仿真中的力觉渲染算法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011)
- [28] Wang D, Zhang Y, Yong W, *et al.* Haptic rendering for dental training system[J]. *Science in China: Information Sciences*, 2009, 52(3): 529-546
- [29] Zilles C B, Salisbury J K. A Constraint-based god-object method for haptic display[C] //Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1995, 3: 146-151
- [30] Johnson E D, Willemsen P, Cohen E. Six degree-of-freedom haptic rendering using spatialized normal cone search[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2005, 11(6): 661-670
- [31] Chai D. The essential nature of touch is connection[OL]. [2016-04-30]. <http://www.chai3d.org/>
- [32] Barbic J, James D L. Six-dof haptic rendering of contact between geometrically complex reduced deformable models[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2008, 1: 39-52
- [33] Morris D, Sewell C, Barbagli F, *et al.* Visuohaptic simulation of bone surgery for training and evaluation[J]. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 2006, 26(6): 48-57
- [34] Hubbard P M. Approximating polyhedra with spheres for time-critical collision detection[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1996, 15(3): 179-210
- [35] Wang D, Shi Y, Liu S, *et al.* The influence of handle-avatar mapping uncertainty on torque fidelity of 6-DOF haptic rendering[C] //Proceedings of IEEE World Haptics Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 325-330
- [36] Yu G, Wang D, Zhang Y, *et al.* Six degree-of-freedom haptic simulation of sharp geometric features using a hybrid sphere-tree model[C] //Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 3314-3319
- [37] Li T V T, Johnson D E, Cohen E. Direct haptic rendering of sculptured models[C] //Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics. New York: ACM Press, 1997: 167-176
- [38] Johnson D E, Li T V T, Kaplan M, *et al.* Painting textures with a haptic interface[C] //Proceedings of the IEEE Virtual Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1999: 282-285
- [39] Gottschalk S. OBB-Tree: a hierarchical structure for rapid interference detection[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1996: 171-180
- [40] Berg F V D, Remke A, Mooij A, *et al.* Performance evaluation for collision prevention based on a domain specific language[M] //Computer Performance Engineering. Heidelberg: Springer, 2013: 276-287
- [41] Gamma. Interactive sound propagation and rendering[OL]. [2016-04-30]. <http://gamma.web.unc.edu/>
- [42] Zhang X, Lee M, Kim Y J. Interactive continuous collision detection for non-convex polyhedra[J]. *Visual Computer*, 2006, 22(9-11): 749-760
- [43] C2A. Planetarium software[OL]. [2016-04-30]. <http://www.astrosurf.com/c2a/english/>
- [44] El-Sana J, Varshney A. Continuously-adaptive haptic rendering [M] //Virtual Environments 2000. Vienna: Springer, 2000: 135-144
- [45] Otaduy M A, Lin M C. Sensation preserving simplification for haptic rendering[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 543-553
- [46] Yoon S, Salomon B, Lin M C. Fast collision detection between massive models using dynamic simplification[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2004: 136-146
- [47] Liu P, Shen X, Georganas N. Multi-resolution modeling and locally refined collision detection for haptic interaction[C] //Proceedings of the 5th International Conference 3-D Digital Imaging and Modeling. Los Alamitos: IEEE Computer Society

- Press, 2005: 581-588
- [48] Zhang L. Efficient motion planning using generalized penetration depth computation[D]. Chapel Hill: University of North Carolina, Computer Science Department, 2009
- [49] Pavel K, Sochor J. Velocity driven haptic rendering[C] //Proceedings of International Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 389-394
- [50] Otaduy M A, Lin M C. A modular haptic rendering algorithm for stable and transparent 6-DOF manipulation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(4): 751-762
- [51] Mcneely W A, Puterbaugh K D, Troy J J. Voxel-based 6dof haptic rendering improvements[J]. Haptics, 2006, 3(7): 1-12
- [52] Seth A. Development of a Dual-handed haptic assembly system: sharp[J]. Journal of Computing & Information Science in Engineering, 2008, 85(4): 925-933
- [53] Ortega M, Redon S, Coquillart S. A six degree-of-freedom god-object method for haptic display of rigid bodies with surface properties.[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2007, 13(3): 458-469
- [54] Zhang L, Kim Y J, Varadhan G, *et al.* Generalized penetration depth computation[J]. Computer-Aided Design, 2006, 39(8): 173-184
- [55] Duriez C, Dubois F, Kheddar A, *et al.* Realistic haptic rendering of interacting deformable objects in virtual environments[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2006, 12(1): 36-47
- [56] Baraff D. Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1989: 223-232
- [57] Wang D, Zhang X, Zhang Y, *et al.* Configuration-based optimization for six degree-of-freedom haptic rendering for fine manipulation[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2013, 6(2): 167-180
- [58] Wang D, Zhang Y, Yang X, *et al.* Force control tasks with pure haptic feedback promote short-term focused attention[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2014, 7(4): 467-476
- [59] Yu G, Wang D, Zhang Y, *et al.* Simulating sharp geometric features in six degrees-of-freedom haptic rendering[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2015, 8(1): 67-78
- [60] Mirtich B V. Impulse-based dynamic simulation of rigid body systems[C] //Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics. Berkeley: University of California Press, 1996: 3-16
- [61] Constantinescu D, Salcudean S E, Croft E. Haptic rendering of rigid contacts using impulsive and penalty forces[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(3): 309-323
- [62] Wan M, Mcneely W A. Quasi-static approach approximation for 6 degrees-of-freedom haptic rendering[C] //Proceedings of International Conference on IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 257-262
- [63] Delingette H, Subsol G, Cotin S, *et al.* A craniofacial surgery simulation testbed[J]. Visualization in Biomedical Computing, 1994, 2359(1): 607-618
- [64] Wang D, Shi Y, Liu S, *et al.* Haptic simulation of organ deformation and hybrid contacts in dental operations[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2014, 7(1): 48-60
- [65] Agus M, Giachetti A, Gobbetti E, *et al.* Real-time haptic and visual simulation of bone dissection [J]. Presence, 2002, 12(1): 209-216
- [66] Liu G, Zhang Y, Wang D, *et al.* Stable haptic interaction using a damping model to implement a realistic tooth-cutting simulation for dental training[J]. Virtual Reality, 2008, 12(2): 99-106
- [67] Liu G, Zhang Y, Townsend W T. Force modeling for tooth preparation in a dental training system[J]. Virtual Reality, 2008, 12(3): 125-136
- [68] Pai D K, Doel K V D, James D L, *et al.* Scanning physical interaction behavior of 3D objects[C] //Proceedings of International Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2001: 87-96
- [69] Okamura A M, Christina S, O'Leary M D. Force modeling for needle insertion into soft tissue[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004, 51(10): 1707-1716
- [70] Hover R, Luca M D, Szekely G, *et al.* Computationally efficient techniques for data-driven haptic rendering[C] //Proceedings of IEEE Symposium on Eurohaptics Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 39-44
- [71] Wang Dangxiao, Zhang Yuru, Wang Yong, *et al.* Haptic rendering for dental training system[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 39 (1): 159-174
- [72] Jia Shiyu, Pan Zhenkuan. Deformation simulation of soft tissue based on Tensor-Mass model in virtual surgery[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(7): 1686-1690(in Chinese)
(贾世宇, 潘振宽. 虚拟手术中基于 Tensor-Mass 的变形仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7): 1686-1690)
- [73] Wu Juan, Song Aiguo, Li Jianqing. A quick physics-based deformation model and real-time force reflection algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(1): 90-94 (in Chinese)
(吴涓, 宋爱国, 李建清. 一种基于物理意义的快速力反馈形变模型及实时力觉响应算法[J]. 传感技术学报, 2005, 18(1): 90-94)
- [74] Zhang Xiaorui, Song Aiguo, Sun Wei, *et al.* Virtual liver surgery simulation system supporting haptic feedback[J]. Journal of Southeast University: Nature Science Edition, 2009, 39(3): 490-494(in Chinese)
(张小瑞, 宋爱国, 孙伟, 等. 支持力/触觉反馈的虚拟肝脏手术仿真系统[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(3): 490-494)
- [75] Yang Wenzhen. Realistic force rendering for virtual hand interactions [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007(in Chinese)
(杨文珍. 虚拟手交互真实力觉生成研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007)
- [76] Han Xiaoxia, Wan Huagen, Zhou Zhihua. Real-time haptic rendering of highly complex quasi-convex objects [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(1): 60-66(in Chinese)
(韩晓霞, 万华根, 周智华. 高度复杂拟凸体的实时触觉绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(1): 60-66)
- [77] Liu Dong, Xiong Yueshan, Tan Ke, *et al.* An improved Boolean operation & algorithm and its application in virtual ACL surgery[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(5): 626-632(in Chinese)

- (刘冬, 熊岳山, 谭珂, 等. 改进的布尔方法及其在虚拟ACL手术中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(5): 626-632)
- [78] Yan Fengxin, Hou Zengxuan, Zhang Dinghua, *et al.* Virtual clay modeling system with force feedback[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(19): 2372-2377(in Chinese)
(闫锋欣, 侯增选, 张定华, 等. 支持触觉力反馈的虚拟油泥造型系统[J]. 中国机械工程, 2009, 20(19): 2372-2377)
- [79] Zhang Xiaorui, Song Aiguo, Liu Jia, *et al.* Development on haptic model and rendering technology of virtual objects[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(15): 4555-4560(in Chinese)
(张小瑞, 宋爱国, 刘佳, 等. 虚拟物体的力/触觉模型及再现技术研究进展[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4555-4560)
- [80] Duriez C. Real-time haptic simulation of medical procedures involving deformations and device-tissue interactions[J]. *Techniques de l'Ingénierie Médicale et de la Complexité - Informatique Mathématiques et Applications*, 2012, 7: 1-3
- [81] Wang D, Zhang Y, Hou J, *et al.* iDental: A haptic-based dental simulator and its preliminary user evaluation[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2012, 5(4): 332-343
- [82] Yang Yi. Design and evaluation of a tactile device for applications on touch screens[D]. Beijing: Beihang University, 2014(in Chinese)
(杨毅. 面向触控交互的触觉交互设备的设计与性能研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014)
- [83] Marchuk N D, Colgate J E, Peshkin M A. Friction measurements on a large area TpaD[C] // *Proceedings of IEEE Haptics Symposium*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 317-320
- [84] Mullenbach J, Shultz C, Piper A M, *et al.* Surface haptic interactions with a TPad tablet[C] // *Proceedings of the Adjunct Publication of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York: ACM Press, 2013: 7-8
- [85] Perez A G, Lobo D, Chinello F, *et al.* Soft finger tactile rendering for wearable haptics[C] // *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2015: 327-332
- [86] Provancher W R, Sylvester N D. Fingerpad skin stretch increases the perception of virtual friction[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2009, 2(4): 212-223
- [87] Culbertson H, Unwin J, Kuchenbecker K J. Modeling and rendering realistic textures from unconstrained tool-surface interactions[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2014, 7(3): 381-393
- [88] Culbertson H, Lopez D J J, Kuchenbecker K J. One hundred data-driven haptic texture models and open-source methods for rendering on 3D objects[C] // *Proceedings of IEEE Haptics Symposium*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 319-325
- [89] Culbertson H, Unwin J, Goodman B E, *et al.* Generating haptic texture models from unconstrained tool-surface interactions[C] // *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013, 4: 295-300
- [90] Raya L, Otaduy M A, Garcia M. Haptic navigation along fili-form neural structures[C] // *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 71-76
- [91] Corenthy L, San Martin J, Otaduy M A, *et al.* Volume haptic rendering with dynamically extracted isosurface[C] // *Proceedings of IEEE Haptics Symposium*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 133-139
- [92] Priedeman W R, Smith D T. Smoothing method for layered deposition modeling: US, 1501669[P]. 2005
- [93] Immersion. Touch is the most powerful human sense[OL]. [2016-04-30]. <http://www.immersion.com/>