

# 速度驱动的复杂场景多层次力觉交互算法

周万琳 王党校 张玉茹 王 瑜

(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)

**摘 要** 触/力觉交互技术应用环境的复杂化,对复杂触/力觉场景的研究提出了新的挑战.文中以虚拟现实牙科手术训练系统为背景,研究基于速度驱动的复杂场景多层次力觉交互算法.文中采用 CATIA 对下牙列大量数据进行网格简化,建立了下牙列场景的层次细节(Levels Of Detail, LOD)模型;基于人类触觉感知的精度随交互速度的变化规律,设计了速度驱动的 LOD 模型触发机制;提出了虚拟工具化身 SCP(Surface Contact Point)层级映射算法,保证了力觉交互设备的稳定性,并发现了映射约束线段的长度是保证力觉逼真性及实时性协调的关键变量;最后,设计了针对一般几何体和复杂曲面的实验,量化评价文中算法的逼真性及实时性,证明了将人手运动速度作为场景模型复杂度切换驱动条件的有效性.

**关键词** 虚拟现实;触/力觉;复杂场景;层次细节;速度驱动

**中图法分类号** TP391 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.01560

## Velocity Driven Levels of Detail Haptic Rendering Algorithm for Complex Scenes

ZHOU Wan-Lin WANG Dang-Xiao ZHANG Yu-Ru WANG Yu

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

**Abstract** In haptic interaction technology, new challenges have been put forward on complex scene rendering. Based on the requirements of a dental training system, velocity driven levels of detail (LOD) haptic rendering algorithm for complex scenes is proposed. Firstly, a large amount of data is simplified with CATIA to realize level-of-detailed modeling for the teeth data. Secondly, based on analysis of the relationship between the perceptible features and the interaction velocity, velocity-driven LOD force rendering algorithm is proposed as switching criteria between discrete model levels. Thirdly, a surface contact point (SCP) mapping algorithm is developed to ensure the continuous change of virtual force signal at switch time between two successive LOD models, which ensures the stability of haptic rendering. Finally, three experiments based on planes, spheres and complex teeth model are carried out to validate the fidelity and stability of the proposed algorithm. The experiments results illustrate that the algorithm can stably render scenes with large numbers of triangles under various interaction velocities.

**Keywords** virtual reality; haptic rendering; complex scene; LOD; velocity driven

## 1 引 言

针对大数量单元存在的虚拟场景,场景的实时

刷新问题是制约力觉研究的一个难点.本文研究背景是虚拟牙科手术培训系统.牙科手术培训的重点是医生手部精细操作能力的训练,牙齿不同病变组织存在微小几何特征和不同物理属性(如硬度、摩擦

收稿日期:2008-08-14;最终修改稿收到日期:2009-06-09.本课题得到国家自然科学基金(60605027)、国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2007AA01Z310)资助.周万琳,女,1984年生,硕士研究生,研究方向为触/力觉人机交互技术. E-mail: zwl@me.buaa.edu.cn. 王党校,男,1976年生,博士,副教授,研究方向为触/力觉人机交互技术、虚拟现实技术、智能机器人技术. E-mail: hapticwang@buaa.edu.cn. 张玉茹,女,1959年生,博士,教授,研究领域为机器人运动学与动力学、触觉人机交互技术、机器人灵巧操作、虚拟样机技术、医用机器人、数字化产品设计技术.王 瑜,女,1982年生,硕士,研究方向为触/力觉人机交互技术.

等),虚拟牙齿要提供精细的触觉感受,必须建立在拥有大量数据的精细模型基础之上.在本文的研究对象中,如图 1(a)所示的全口内单排牙列,其表面三维测量数据顶点数 143865,面对数量如此巨大的



(a) 大数据量单排牙列

模型,仿真系统难以满足 1kHz 的力觉渲染需求.如果简化数据,虽然能满足视觉和力觉渲染的实时性,但感受牙齿表面的微小几何特征(如图 1(b))所需的力觉逼真度难以保证.



(b) 单牙龋齿模型:精细的几何与物理特征

图 1 牙科手术培训系统交互场景示意图

在复杂场景图形场景渲染研究中,对于不必要使用高分辨率模型的情况,通常采用网格简化技术来提高渲染效率,主要分为两类方法:静态和动态化简方法<sup>[1]</sup>.对模型准确度和计算时间折中的做法是采用层次细节(LOD)技术,其方法有两种:静态构造几个 LOD 模型以及动态构造连续的 LOD 模型,后者一般采用渐进式网格来实现<sup>[2]</sup>.例如 Xia<sup>[3]</sup>将连续 LOD 发展为一个基于视点的为地形建模服务的 LOD,这种方法精细化用户凝视的地方,其他部分保持粗糙的模型.

然而将 LOD 技术推广到力觉交互中,面临力觉循环 1000Hz 的计算需求,产生了新的问题. El-Sana 等人将多分辨率用于力觉渲染,在探针附近区域采用精细网格,在其余区域采用粗网格<sup>[4]</sup>. Otaduy 开发了针对凸面片的多分辨率包围盒构建方法,但是不支持渐进的传输,因此不适合具有有限内存空间的力觉渲染环境<sup>[5]</sup>. Liu 等介绍了一种新型的“局部细分”方法来满足力觉渲染对快速碰撞检测的要求<sup>[6]</sup>,精确的碰撞检测只在局部细分的网格上进行. Zhang 等提出在粗糙网格模型上细分感兴趣的区域的方法,通过控制模型的节点数,来调和柔软物体变形时力反馈计算要求快速与图形显示要求计算细节的矛盾,以保证仿真能够高效率地进行<sup>[7]</sup>. Kolcarek<sup>[8]</sup>等人将人的探查速度作为多分辨率模型之间切换的触发条件,利用归并树数据结构构造多分辨率的交互模型,但其数据结构比较复杂,不容易保证算法稳定性.

综合上述研究情况,基于 LOD 模型的力觉交互技术中尚未解决的两个关键问题是:

(1) 选择何种类型的 LOD 模型? 所选模型既要能保留模型的几何特征,又要能够适应力觉渲染计算的快速性要求;

(2) 不同的 LOD 模型的触发条件如何定义? 在图形学领域中,基于视点的 LOD 模型触发条件很好地模拟了人类的视觉感知特性.在触觉感知中,如何定义新的触发条件,并保证交互过程的稳定性?

针对上述问题,本文提出了速度驱动的复杂场景多层次力觉渲染方法.根据人在不同速度下探查物体表面的不同触觉特征,通过测量交互速度来触发不同的模型层级调用,以满足力觉/视觉渲染实时性和逼真性的要求.

本文第 2 节针对复杂场景逼真性与力觉交互实时性之间的矛盾,提出复杂场景的力觉建模技术、支持力觉交互的 LOD 模型以及速度驱动的多分辨率渲染算法;第 3 节介绍实验结果;第 4 节给出全文结论和未来工作展望.

## 2 速度驱动的力觉渲染算法

### 2.1 复杂场景层次建模

牙齿手术接触仿真中用到的牙齿原始数据为激光扫描得到的牙齿轮廓数据.本系统采用三角片模型描述牙齿,采用点模型描述探针工具.

LOD 模型的建立方法主要有离线 LOD 模型、关注局部区域进行细化的局部细节方法和渐进式网格等.而离线 LOD 模型因其算法简单稳定,成为快速检验 LOD 切换触发条件合理性的最佳方法.

本文在测试 Simplifier 等开源网格简化软件包以后,发现在三角片简化过程中容易出现局部细节丢失、三角片破裂等缺陷.目前图形学中已有许多较为实用的面片简化算法<sup>[1]</sup>,但由于本文的工作重点在于验证速度驱动的力觉渲染算法,故直接采用现成工具软件.调研发现 CATIA 商用软件中数据编辑器模块含有网格简化的功能,可以在给定顶点删除率的情况下,首先选择删除对表面曲率影响小的点,从而保证简化的效果能够有效地保留模型的几何特征,并且可以方便地对面片进行修补等操作.最终选择基于 CATIA 来进行模型的三角片网格简化工作.

图 2 所示为 Stanford bunny 模型在 CATIA 中的简化效果,可以看到利用 CATIA 进行三角片网格模型的简化可以很好地保留模型的几何特征.

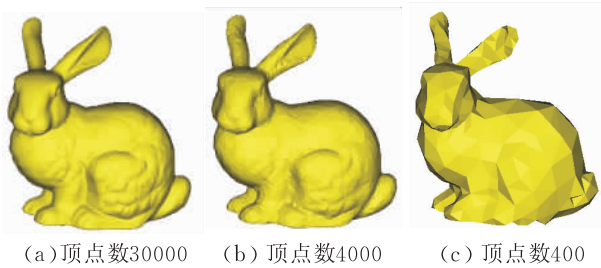


图 2 CATIA 模型简化效果

针对 LOD 模型,需要分别对每个层次细节,结构化存储对应层级模型的拓扑信息,包括三角片网格内部元素拓扑信息和三角片网格与空间包围盒信息两类.每个层级的模型为一个基本数据单元,其数据结构设计为  $LODNode_i \{M_i, R_{MBi}, V_{Vertexi}, V_{Tripolysi}, N_{Vertexi}, N_{Tripolysi}\}$ ,其含义如表 1 所示.

表 1 数据单元  $LODNode$

变量	含义
$M_i$	三角片网格
$V_{Vertexi}$	顶点法向量列表
$N_{Tripolysi}$	三角片相邻几何元素集合
$R_{MBi}$	三角片网格与包围盒关联关系
$V_{Tripolysi}$	三角片法向量列表
$N_{Vertexi}$	顶点相邻几何元素集合

在程序的初始化阶段,需要离线完成这些数据结构的建立工作,将力觉渲染计算的碰撞响应模块中需要用到的模型拓扑信息进行预计算,并加载到内存中,方便仿真交互过程中的快速调用.

将上述网格简化方法和 LOD 模型应用于虚拟牙科手术系统得到的模型效果如图 3、图 4 所示.

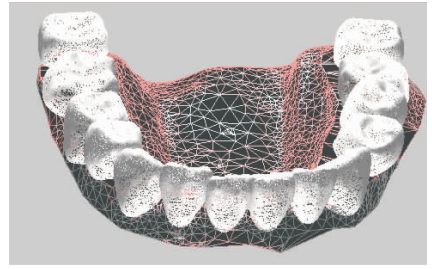


图 3 下牙列低层级线框表示

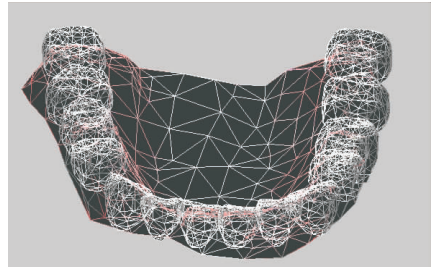


图 4 下牙列高层级线框表示

## 2.2 速度驱动的多分辨率渲染算法

基于人类触觉感知的规律,在人与虚拟环境交互的过程中,交互速度与可感知特征之间存在一定的关系,Kolcarek<sup>[8]</sup>等人的研究表明:当被探测的物体表面曲率比较大的时候,人会不自觉地放慢探测的速度.Lederman 等人通过实验证明人类触觉感知的精度随交互速度的变化规律可以近似拟合为二次曲线,随着速度增加,感知能力相应降低<sup>[9]</sup>.上述研究表明通常在高速探查的情况下,可以忽略局部细节特征,这样并不会损失触觉感受的真实程度.因此本文选择交互速度为 LOD 模型的触发条件.

另一方面,在交互过程中,不同交互速度也将带来计算时间复杂度的差异.在碰撞检测算法中,用  $HIP_i$  代表本次仿真循环的力觉设备点位置,  $HIP_{i-1}$  代表上次仿真循环的力觉设备点位置,  $SCP_{i-1}$  代表上次仿真循环结束时虚拟工具点的位置.则本次仿真循环的轨迹线段长度定义为  $l_i = |HIP_{i-1} HIP_i|$ ,用  $v_i$  表示本次仿真循环的人机交互速度(即交互设备运动速度,也即人手速度运动)的大小,则

$$l_i = K \cdot v_i \quad (1)$$

即轨迹线段的长度与人机交互速度成正比.人手移动交互设备末端杆的速度越快,一个采样周期内虚拟工具点的运动轨迹线段就越长,参与碰撞检测计算的三角片数量就会增加,从而延长了力觉循环所需要的时间,从一定程度上影响交互系统的实时性和逼真性.

分析可知,以满足力觉渲染实时性为前提(力信号刷新频率大于 1kHz),模型可支持的最大交互速

度与该模型的复杂度相关,交互速度越快,能支持的模型复杂度越低,呈减函数。由于其非线性规律未知,基于离散 LOD 的思想,本文提出如图 5 的离散 LOD 速度驱动模型,其中层级 0 为最精细层级,层级精细程度随序号增加而递减。

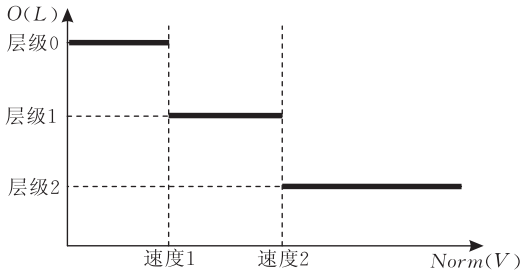


图 5 速度驱动的离散 LOD 切换模型

图 5 中的层级精度根据具体任务的模型精度需求预先给定,速度参数则根据层级模型由实验确定。首先通过对给定几个层级的模型进行力觉交互实验,确定能满足每种模型交互实时性需求的速度阈值,从而确定模型切换的速度。例如 3 个层级需要两个层级切换速度,分别为  $L_0$  (层级 0) 和  $L_1$  (层级 1) 之间的切换速度  $V_{01}$ ,  $L_1$  (层级 1) 和  $L_2$  (层级 2) 之间的切换速度  $V_{12}$ 。在仿真系统中应用速度驱动 LOD 力觉渲染算法过程中,当速度小于等于  $V_{01}$  时,调用最精细的层级  $L_0$ ,当速度大于  $V_{01}$  小于  $V_{12}$  时,调用中间层级  $L_1$ ,当速度大于等于  $V_{12}$  时,调用最粗糙的层级  $L_2$ 。

基于上述模型,在力觉伺服线程中,首先计算交互速度,根据交互速度解算出目标层级的序号,将该层级设置为当前交互的模型对象,根据交互工具的运动信号,进行碰撞检测、碰撞响应计算,从而实现 LOD 速度驱动模型。

### 2.3 SCP 层级映射算法

在验证如图 5 的离散速度驱动模型以后,发现在接触交互发生 LOD 层级切换时,操作者可以感受到明显的振动。分析振动发生的原因后,本文提出一种 SCP (Surface Contact Point) 层级映射算法。该算法减少了振动,提升了力觉交互的逼真度。分析振动发生是由于不同层级之间存在结构误差,其原因如下:

如图 6,当交互速度从  $V_a$  减慢到  $V_b$  时,接触交互 LOD 模型需要从较为粗糙的  $L_{i-1}$ ,切换到较为精细的  $L_i$ 。从力觉渲染流程可以看到,上一时刻碰撞发生,当前的交互状态处于碰撞发生阶段,当前时刻应该继续碰撞响应模块,根据上一仿真循环结束时的虚拟工具点位置 SCP,基于其所从属的几何元素,进行碰撞响应阶段的计算。然而,SCP 点位于

$L_{i-1}$  的几何元素上,而该几何元素可能在多分辨率模型建立的网格简化过程中受到过简化,且不同层级的几何元素有着不同的拓扑结构,因此需要在目标层级从  $L_{i-1}$  切换到  $L_i$  的同时,将位于  $L_{i-1}$  上的  $SCP_{i-1}$  点向  $L_i$  做映射,求解  $SCP_i$ 。从而保证层级切换时力信号的连续性,以消除振动感。

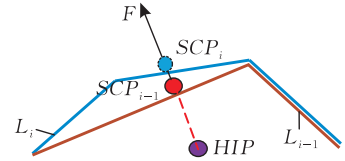


图 6 LOD 切换中的 SCP 层级映射

下面介绍 SCP 层级映射算法。为方便描述问题,本文定义映射约束线段、映射约束包围盒单元如下。

**定义 1.** 映射约束线段。

上次仿真循环结束时所计算出的交互力用  $F_{i-1}$  表示,方向为  $\vec{n}$ ,虚拟工具点位置用  $\overrightarrow{SCP}_{i-1}$  表示。定义映射约束线段的起点为  $SCP_{i-1}$ ,方向沿  $\vec{n}$ ,线段的长度为  $L$ ,则可解算出映射约束线段  $P_1P_2$ ,其中

$$\vec{P}_1 = \overrightarrow{SCP}_{i-1} \quad (2)$$

$$\vec{P}_2 = \overrightarrow{SCP}_{i-1} + L \cdot \vec{n} \quad (3)$$

**定义 2.** 映射约束包围盒单元。

定义映射约束包围盒单元为与映射约束线段相交的哈希包围盒单元,如图 7。为了计算位于  $L_i$  上的  $SCP_i$  点,需要计算  $P_1P_2$  与  $L_i$  三角片网格的交点,首先应该获取与  $P_1P_2$  相交的包围盒,然后根据三角片网格与包围盒之间的关联关系,将遍历相交包围盒中的三角片与  $P_1P_2$  求交计算得到  $SCP_i$ 。

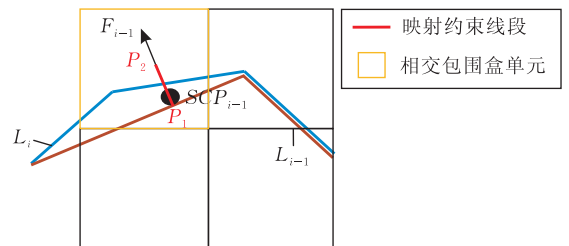


图 7 映射约束线段与映射约束包围盒单元

根据  $P_1$  和  $P_2$  的体素坐标  $P_1(n_{1x}, n_{1y}, n_{1z})$ ,  $P_2(n_{2x}, n_{2y}, n_{2z})$ ,计算包围盒对象的两个角点,利用 GHOST SDK 的求交函数,对这两个角点内的所有体素进行遍历,记录相交体素为一个相交包围盒单元,所有相交包围盒单元构成映射约束包围盒集合。

SCP 层级算法流程如下:

1. 设置映射约束线段长度为  $L$ ;
2. 根据  $SCP_i$  与  $F_{i-1}$  构造映射约束,并求解映射约束包

包围盒集合;

3. 遍历包围盒中所有关联三角片,判断三角片与映射约束线段是否相交;
  - 3.1. 相交则记录交点为目标层级  $L_i$  上的  $SCP_i$ ,同时设置映射发生标志为真;
  - 3.2. 不相交,则判断包围盒遍历是否结束;
    - 3.2.1. 包围盒遍历结束,则记录  $\overrightarrow{SCP_{i-1}}$  为  $SCP_i$ ,设置映射标志发生为假;
    - 3.2.2. 否则,返回步 3 继续遍历包围盒中关联三角片.

分析上述算法可以看到,正确设置映射约束线段的长度  $L$  对于提高算法效率非常重要. 过大的  $L$  会无谓增加映射约束包围盒单元,增加三角片遍历和求交计算的耗时;过小的  $L$  可能导致  $SCP_i$  解算为空,错误设置映射发生标志进入碰撞检测计算模块,此时的碰撞检测计算结果将误判为碰撞分离,会使得层级切换时交互力不连续.  $L$  的取值应略大于层级间模型的误差值最为合适,以下牙列交互为例,不同层级之间的误差最大值为 2mm,本文通过实验确定了  $L$  的合适取值为 5mm.

在加入 SCP 层级映射算法以后,本文研究的基于速度驱动的复杂场景多层次力觉交互算法保证了多分辨率力觉渲染逼真性和实时性的协调. 其总体流程如下:

1. LOD 模型初始化;
2. 采集工具的运动信号,并计算交互速度;
3. 根据速度计算目标层级,并将相应模型设置为当前交互模型;
4. 判断上一仿真周期接触状态是否为真;
  - 4.1. 为真,则判断是否发生层级切换
    - 发生层级切换,则调用层级映射模块,映射为真则进入响应计算模块;
    - 映射为假则进入碰撞检测;
  - 4.2. 为假,则进入碰撞检测模块,判断碰撞是否发生;
    - 发生,则设置碰撞发生标志,进入步 5 的碰撞响应模块;
    - 否则设置碰撞分离标志,返回步 2;
5. 碰撞响应计算模块;
6. 判断碰撞状态维持与否;
  - 6.1. 碰撞状态维持,则计算接触力;
  - 6.2. 否则,设置碰撞分离标志,并返回步 4.

在工具和牙齿接触交互中,采用基于嵌入深度的弹簧力模型来计算接触法向力. 弹簧力模型是力觉渲染领域中计算正压力的经典模型<sup>[11]</sup>,其优点是计算效率高,并能够反映工具和牙齿的不同接触状态下正压力的细微变化. 针对牙齿表面牙釉质刚性极大

的特点,通过设定一个比较大的弹簧系数,即可以使人的生理学感受接近于真实牙齿探查的挤压感受.

### 3 多层次力觉渲染算法实验验证

本文实验系统物理样机如图 8、配置如表 2 所示.

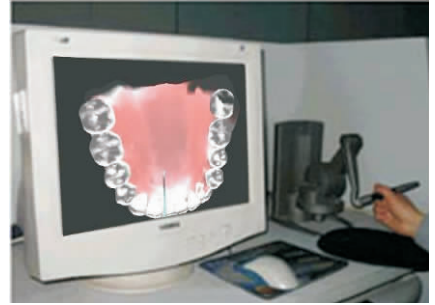


图 8 实验系统物理样机图

表 2 系统软硬件配置

CPU	Intel(R) Core(TM)2 duo E4500 @ 2.20GHz 2.190GHz
内存	2.00GB
显卡	GeforceFX 5700LE
力觉设备	Phantom Desktop
操作系统	Windows XP
开发环境	Visual Studio 6.0
力觉开发包	GHOST SDK
图形开发包	OpenGL

#### 3.1 平面滑动探查实验

本实验通过对不同精度的平面进行变速交互,从而分别验证场景复杂程度(本文中即三角片数量)、交互速度和算法稳定性之间的关系. 构建如图 9 所示  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$  的正方形平面,该平面在坐标系中位于  $XOY$  平面上,中心与坐标原点重合.

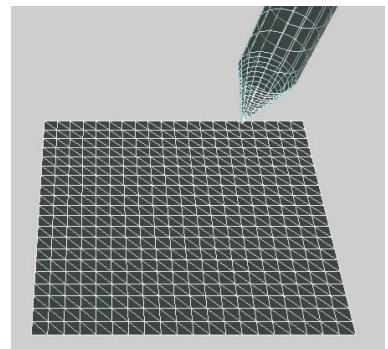


图 9 平面探查实验线框模型

本文研究的算法稳定性影响因素主要有场景复杂程度(三角片数量)和交互速度两个. 为了了解每个变量对稳定性的独立影响,该实验分为两个部分: (1) 控制交互速度在一定范围的情况下,研究场景

复杂程度对稳定性的影响;(2)在场景三角片数量一定的情况下,研究交互速度对算法稳定性的影响.下面阐述这两方面的实验结果:

(1) 场景复杂程度对稳定性的影响

针对场景三角片数量分别为 800 与 5000 两种情况,进行快速(平均速度 120mm/s 以上)滑动交互,其输出力信号及相对应的速度曲线分别如图 10~图 13 所示.图中十字形、三角形和圆圈分别标记的曲线表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的力信号.

由图 10~图 11 可知,当场景三角片数量很小时,进行任意加速度的探查,力信号均稳定、逼真.由于本实验为平面探查,故图 10 中  $x$ 、 $y$  方向的分力均为 0,当交互工具脱离平面进入自由空间时, $z$  方向分力也为零.与之相反,当三角片数量增大到 5000,如图 12 所示, $x$ 、 $y$  方向没有保持为零,3 个方向均出现了力的跳变,此时人感觉到交互设备的抖动,真实感明显下降.可以认为已经不能满足交互需求.分析本文力觉渲染算法可知,三角片数量增加时,每个力觉线程内参与求交的三角片数量增加,计算开销增大,场景复杂程度直接关系到力渲染算法的逼真性和稳定性,因此单一地提高场景的精细程度并不能解决触觉感受逼真性的问题,层次细节的方法从一定程度上降低了场景复杂程度.

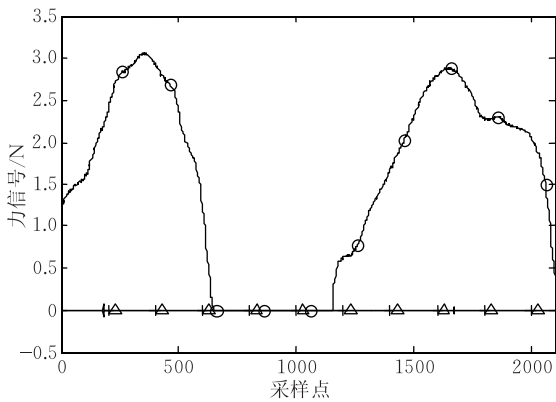


图 10 三角片数量 800 的力曲线

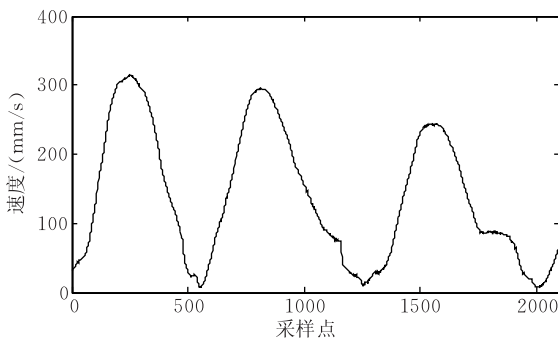


图 11 三角片数量 800 的速度曲线

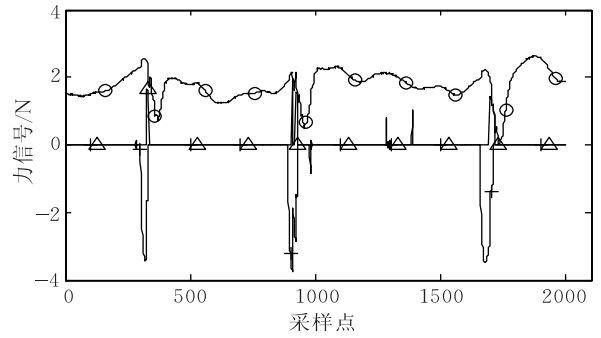


图 12 三角片数量 5000 的力曲线

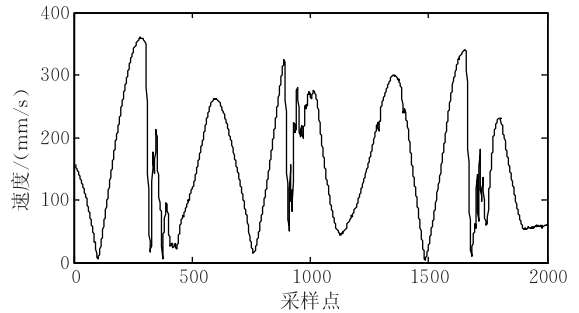


图 13 三角片数量 5000 的速度曲线

(2) 交互速度对稳定性的影响

针对场景三角片数量固定为 80000 的情况,分别进行低速(小于 30mm/s)、中速(30mm/s ~ 80mm/s 之间)、高速(大于 80mm/s)的触觉交互,研究交互速度对算法稳定性的影响.

由图 14~图 19 可以看出,针对三角片数量为 80000 的复杂场景,进行低速交互时,力信号稳定、逼真;中速交互时,开始出现少量力的跳变,真实感和稳定性减弱;快速交互时,3 个方向力的剧烈跳变,影响了正常交互,由于  $x$ 、 $y$  方向的阻力频繁地产生,从而限制了交互速度,使之很难达到 200mm/s 以上.以上实验表明,对于复杂的场景,低、中速的交互通常可以接受,然而高速交互十分困难,由此可见,以速度作为模型切换条件具有合理性.

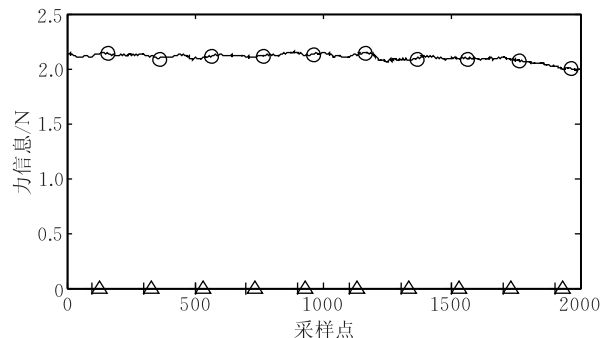


图 14 低速交互的力曲线

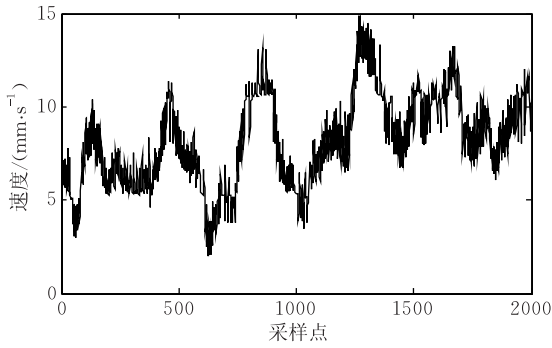


图 15 低速交互的速度曲线

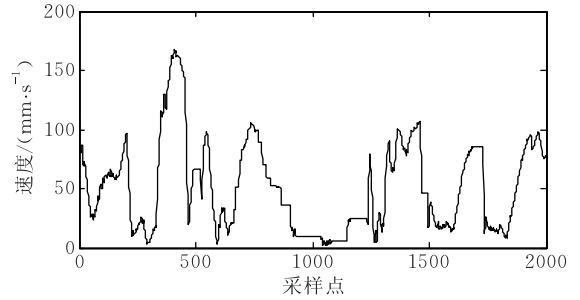


图 19 高速交互的速度曲线

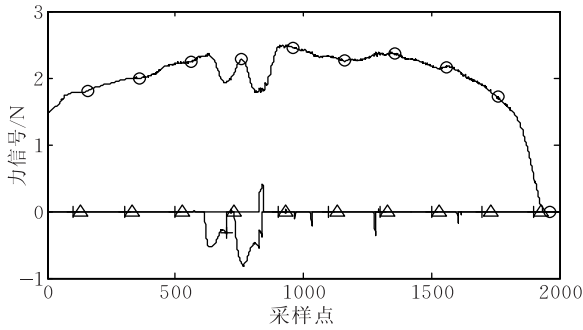


图 16 中速交互的力曲线

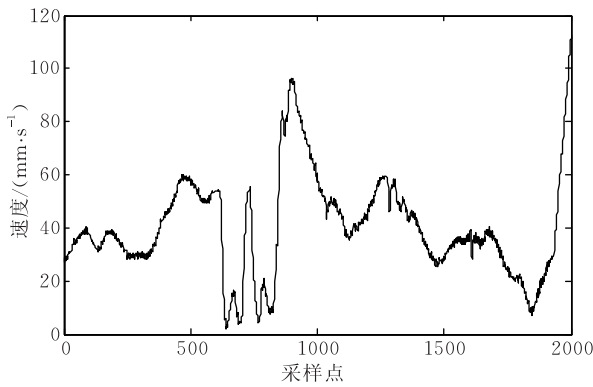


图 17 中速交互的速度曲线

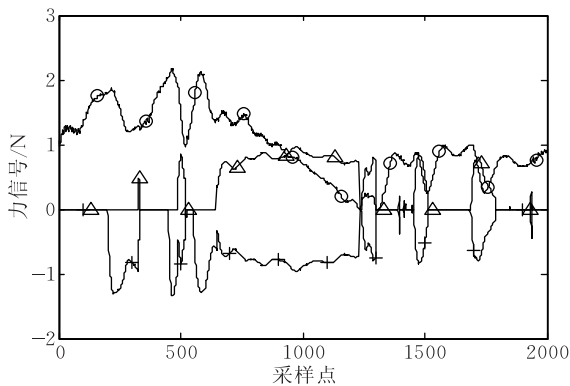


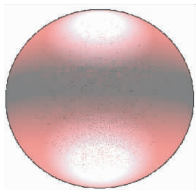
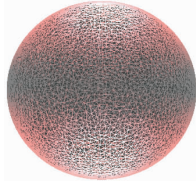
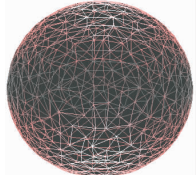
图 18 高速交互的力曲线

### 3.2 球模型实验

在验证了层次细节方法以及其速度驱动条件的合理性之后,本实验通过复杂球模型来验证速度驱动 LOD 力觉渲染算法的快速性和逼真性. 构建一个三层次的球体模型,球体直径为 100mm. 实验的基本思想是,分别对复杂球模型采用单一模型力觉渲染算法和速度驱动 LOD 力觉渲染算法,进行力觉交互仿真实验,从用户体验和力信号曲线两个方面度量速度驱动 LOD 力觉渲染算法在快速性和逼真性两个方面的性能.

建立复杂球模型的 LOD 模型如表 3 所示. 建立了 3 个层级的球体多分辨率模型,首先需要通过对这几个模型的力觉交互实验,确定能满足每种模型交互实时性需求的速度阈值,从而按 2.1 节介绍的方法确定模型切换的速度  $V_{01}$ 、 $V_{12}$ ,此处由实验选定  $V_{01}=20\text{mm/s}$ ,  $V_{12}=150\text{mm/s}$  作为切换条件. 当速度小于等于  $V_{01}$  时,调用最精细的层级  $L_0$ ; 当速度大于等于  $V_{12}$  时,调用最粗糙的层级  $L_2$ ; 否则,调用  $L_1$ .

表 3 球体 LOD 模型

层级	线框表示图	顶点数	三角片数
层级 0		50937	101870
层级 1		5016	10028
层级 2		511	1018

对不同层级直接进行变速接触交互实验,实验结果如图 20~图 22 所示。图中十字形、三角形和圆圈分别标记的曲线表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的力信号。可以看到,在层级 0 下,人在交互时间歇性感受到振动;在力曲线上,可以看到频繁出现尖点突起;同时观察力觉循环所消耗的时间,发现模型太过复杂,系统难以达到的响应频率带来了振动。在层级 2 下,由于模型太简单,人在滑动探查感受球体表面的时候,能明显感觉到三角片网格的棱边;在力曲线上,可以看到在主要的力觉感受之上始终伴随了较大的波动,影响了力觉真实感。在对 LOD 模型交互过程中,可以看到,力信号平滑无振动,在慢速力觉交互时,操作者可以感受精确模型层级带来的逼真力觉感受,感受到的球体表面光滑无棱边;在快速力觉交互时,简化的模型层级有效地满足了力觉渲染快速性的要求。

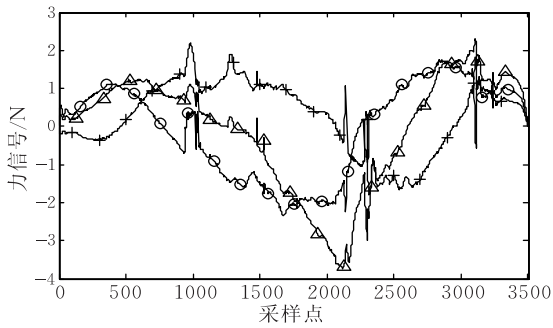


图 20 层级 0 交互力曲线

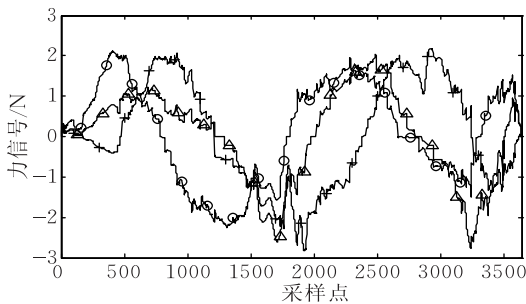


图 21 层级 2 交互力曲线

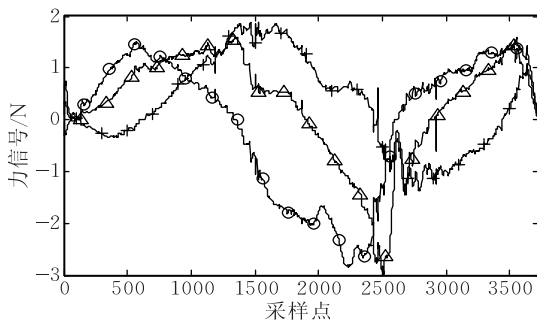


图 22 LOD 模型交互力曲线

### 3.3 下牙列模型实验

牙面探诊是牙科手术重要的一步。下面对图 23 下牙列模型进行速度驱动 LOD 力觉渲染实验,以证实算法的可行性。牙齿齿面“凹”“凸”区域并存,而且存在尺寸为 0.1mm 左右的微小凹坑和尖点等几何特征,可以验证算法对复杂曲面模型的适应能力。

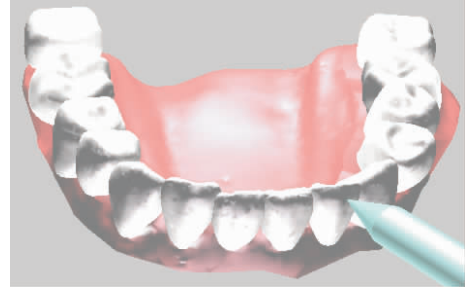


图 23 下牙列模型渲染图

本节对比实验为:全口内单排牙列数据顶点数 143865 单一模型实验及基于表 4 的 LOD 模型实验。其中 LOD 模型实验中由于原始全口数据量太大,超出了可以存储的内存容量,故最精细层级选择如表 4 所示。

表 4 下牙列 LOD 模型数据量

	顶点数	三角片数
层级 0	33140	66224
层级 1	13306	26556
层级 2	7443	14830

图 24 为对下牙列层级 0 模型进行力觉交互实验的力信号曲线,可以看出曲线明显震荡,碰撞发生之后交互设备剧烈振动,同时图形显示滞后,不能满足交互需求。

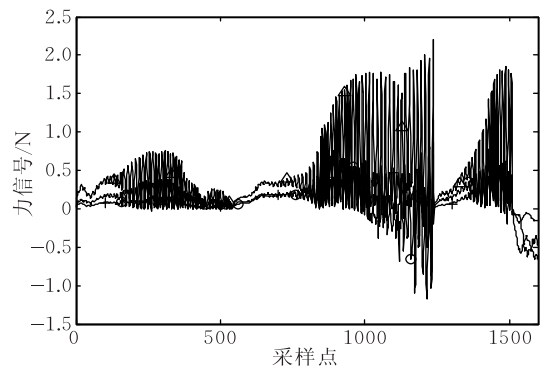


图 24 对下牙列层级 0 模型进行力觉交互

同样,由实验选定  $V_{01} = 30\text{mm/s}$ ,  $V_{12} = 120\text{mm/s}$  作为切换条件。图 25 为对全口 LOD 模型进行变速力觉交互的力信号曲线,图中十字形、三角形和圆圈分别标记的曲线表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的力信号。在口腔

医学操作中,分为快速的探诊和慢速探查龋齿两步,图 26 所示速度变化包含了口腔医学操作速度范围需求.对比图 24 与图 25 的力信号可以看到,相比于直接对精细模型层级的接触交互,速度驱动 LOD 的力觉渲染使得与全口模型交互过程中,3 个方向的力曲线明显平滑,人的力觉感受流畅无振动.由图 25、图 26 可知在常规操作速度下探查模型切换时逼真性和实时性均不受影响.可见,速度驱动 LOD 力觉渲染算法亦能很好地支持复杂曲面模型.

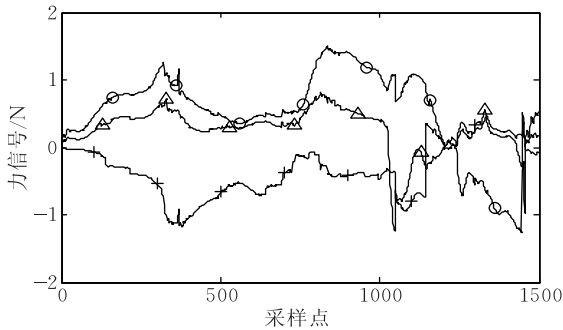


图 25 对全口 LOD 模型进行力觉交互

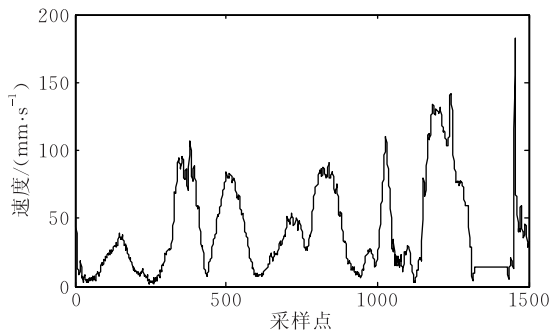


图 26 全口 LOD 模型力觉交互速度曲线

### 3.4 实验讨论

综合以上实验结果,针对下牙列交互的场景,选择 3 个模型层次已经可以满足流畅无震荡的手术模拟交互需求.当交互任务变化时,可以根据具体任务选择不同的等级数量和精度,本文算法可以方便地扩展到 3 个以上的层级.

通过实验检验了 LOD 模型构造方法对力觉交互逼真性和稳定性的影响. LOD 模型的研究主要有两种思路:生成多个独立的细节层次或生成连续层级的三角片网格模型.两种研究思路各有利弊,多个独立的细节层次虽然构造方法简单,但层次间跳跃往往比较大,本文的 SCP 层级映射弥补了这一点.另一方面,连续的 LOD 生成方法有对不同细节层级进行插值、使用累进网格等几种.这个研究思路对于计算机内存的需求有所降低,同时可以方便地支持

持接触点处局部细节模型的建立,但是实时计算部分的开销增大,对算法要求较高,同时对原始三角片网格存在一定约束.并且在局部模型切换中,同样需要解决稳定性问题.考虑本文的层级映射算法弥补了前一种研究思路的不足,同时简单可靠,本文选择了多个独立 LOD 层级的模型.



图 27 全口腔模型数据

下一步工作中,可能需要处理更大规模的模型数据,例如处理病人的面部和全口牙齿的数据,如图 27.现有的离散 LOD 方法需要预存储大量层级信息,数据规模(见表 5)可能超出了内存容量,不能适应需求.因此本文进一步要研究基于局部网格细化模型的方法,来平衡数据量与准确性的矛盾.

表 5 全口腔模型数据量

	顶点数/个	三角片数/个
头部	1324846	2638217
脸部	6338	12556
上牙列	635470	1270536
下牙列	588753	1176883
上牙床	58809	112386
下牙床	35107	65200
舌头	369	656

## 4 结 论

针对复杂场景的力觉交互问题,提出了速度驱动的多分辨率力觉渲染算法.文章主要结论包括 3 方面:

(1) 针对 LOD 模型的不同特点,选择离散 LOD 模型,精细模型保留了低速操作下所需的细微几何特征,粗糙模型有效降低高速交互时的计算开销,并且由于所有层级的模型离线生成,避免了在线模型重构所带来的计算消耗,从而适应了力觉渲染计算的快速性要求.

(2) 本文首先基于前人提出的人可感知细微特征的能力随交互速度增大而减小的触觉感知规律,

确定将速度作为不同的 LOD 模型的触发条件;同时分析碰撞检测算法,从原理上证明了采用速度驱动的多分辨率渲染算法的可行性.然后,通过实验确定了人的交互速度为影响复杂物体力觉渲染实时性的关键因素之一.因此选定人的交互速度作为 LOD 模型触发条件是正确合理的.研究了速度驱动的针对速度切换时带来的力信号突变问题,运用 SCP 层级映射改进碰撞检测算法,避免模型层级切换时力信号的振动.

(3)实验证明本文研究的多分辨率力觉交互技术能够支持大数据量模型的力觉交互要求,并能够使用户感受到如牙齿齿面一样“凹”、“凸”区域共存的复杂曲面.通过速度驱动的 LOD 力觉渲染算法,一方面保证了慢速力觉交互时对力觉渲染精度的要求,另一方面保证了快速力觉交互时对力觉渲染快速性的要求,从而实现了复杂场景的实时力觉渲染.

针对虚拟手术培训中力觉交互的特点,工具探针往往会在某个牙齿病变局部进行精细操作,因此未来工作将研究接触点局部的网格细分方法,以达到场景中的三角片网格具有自适应的网格精度,即接触点附近通过精细的三角面片最完整的保留力觉细节特征,而远离探针尖端的不关注的部分采用更粗糙的网格模型,并开展相应的触觉生理学实验,以便为网格细分算法设计提供依据.

**致 谢** 感谢于歌博士生对本文工作的支持!

### 参 考 文 献

[1] He Hui-Guang, Tian Jie, Zhang Xiao-Peng. A survey on mesh simplification. *Journal of Software*, 2002, 13(12):

2215-2224(in Chinese)

(何辉光, 田捷, 张晓鹏. 网格模型化简综述. *软件学报*, 2002, 13(12): 2215-2224)

- [2] Hoppe H. Progressive meshes//*Proceedings of the SIGGRAPH'96*. New Orleans, LA, USA, 1996: 99-108
- [3] Xia J C, Varshiney A. Dynamic view-dependent simplification for polygonal models//*Proceedings of the IEEE, Visualization*. San Francisco, California, USA, 1996: 327-334
- [4] El-Sana J, Varshiney A. Continuously-adaptive haptic rendering//*Proceedings of the Virtual Environments*. San Francisco, California, USA, 2000: 135-144
- [5] Otaduy M A, Lin M C. Sensation preserving simplification for haptic rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 543-553
- [6] Liu Peiran, Shen Xiaojun, Georganas Nicolas. Multi-resolution modeling and locally refined collision detection for haptic interaction//*Proceedings of the 5th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'05)*. Ottawa, Canada, 2005: 581-588
- [7] Zhang Jian, Payandeh Shahram, Dill John. Haptic subdivision: An approach to defining level-of-detail in haptic rendering//*Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces For Virtual Environment & Teleoperator Systems (HAPTICS'02)*. Orlando, Florida, 2002: 201-208
- [8] Kolcarek P, Sochor J. Velocity driven haptic rendering//*Proceedings of the 3rd International Conference on Computer*. Dunedin, New Zealand, 2005: 389-394
- [9] Lederman S J et al. Perceiving roughness via a rigid probe: Psychophysical effects of exploration speed and mode of touch. *The Electronic Journal of Haptics Research*, 1999, 1(1): 1-20
- [10] Garland Michael, Heckbert Paul S. Surface simplification using quadric error metrics//*Proceedings of the SIGGRAPH 97*. New York, USA, 1997: 209-216
- [11] Zilles C B, Salisbury J K. A constraint-based god object method for haptics display//*Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Pittsburgh, PA, 1995: 146-151



**ZHOU Wan-Lin**, born in 1984, M. S. candidate. Her research interests focus on haptic interfaces.

**WANG Dang-Xiao**, Ph. D., associate professor. His research interests include haptic interfaces, virtual reality, robotics

**ZHANG Yu-Ru**, Ph. D., professor. Her research interests include robot kinematics and dynamics, haptic interfaces, dexterous manipulation, medical robots.

**WANG Yu**, born in 1982, M. S.. Her research interests focus on haptic interfaces.

## Background

The paper discusses about haptic interaction technology, which is a special branch in virtual reality. Haptic interaction discusses how to improve the communication between human and computer, and the communication between human and robots through the sense of touch. Its application areas include: surgery simulation, entertainment, tele-robot, computer-aided-design and industrial design etc. Researchers in both computer graphics and interactive techniques have showed great interests in haptics. People mainly focus on haptic rendering algorithms for various geometric representations. In this paper, velocity driven levels of detail (LOD) haptic rendering algorithm for complex scenes is proposed.

The project was sponsored by National Natural Science Foundation of China (60605027) and the National High

Technology Research and Development Program (863 Program) of China (2007AA01Z310). The project is mainly about haptic technology and visual-haptic collocation system, which may be used in dental surgery simulation or virtual assembling.

Human-machine Interaction Lab mainly focuses on haptic interaction. The goal is to discover and understand the mechanism of haptic in information communication, and to make creation and invention using the mechanism. The authors have developed haptic simulation systems including a dental surgery simulation prototype. However the virtual scenes of the dental surgery simulation system cannot be too complex because of the refresh rate of the haptic system. The result in this paper helps to increase the capacity of data sets.