

1-8-2019

## Interactive Modelling on Smooth Weighted Distance Surface in HMD VR Environment

Xiaoqiang Zhu

*1. School of Communication and Information, Shanghai University, Shanghai 200444, China;;2. Institute of Smart City, Shanghai University, Shanghai 200444, China;*

Hongyi Pan

*1. School of Communication and Information, Shanghai University, Shanghai 200444, China;;2. Institute of Smart City, Shanghai University, Shanghai 200444, China;*

Xu Hao

*1. School of Communication and Information, Shanghai University, Shanghai 200444, China;;2. Institute of Smart City, Shanghai University, Shanghai 200444, China;*

Song Lei

*1. School of Communication and Information, Shanghai University, Shanghai 200444, China;;2. Institute of Smart City, Shanghai University, Shanghai 200444, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Interactive Modelling on Smooth Weighted Distance Surface in HMD VR Environment

### Abstract

**Abstract:** An interactive modelling scheme in immersive VR environment is proposed, in which the *point, line and polygon skeletons are inputted by handles of HMD (Head-Mounted Device)*. *Weighted distance field is calculated in parallel with CUDA on GPU according to the varying radii, and then the iso-surface is extracted using paralleled marching cubes*. In order to avoid the non-smoothness at interactions between different distance surface components, *weighted filtering kernels are utilized to smooth the skeleton-based distance field with various radii in our modelling system, so that smooth blending model is produced from multi-component distance fields*. In our system, natural interactions suitable for non-professionals are provided to *create smooth models with manifold surface which can be directly 3D printed without further post-process*.

### Keywords

distance surface, implicit surface, virtual reality, head-mounted device, human-computer interaction

### Authors

Xiaoqiang Zhu, Hongyi Pan, Xu Hao, Song Lei, Mengyao Zhu, and Xiangyang Wang

### Recommended Citation

Zhu Xiaoqiang, Pan Hongyi, Xu Hao, Song Lei, Zhu Mengyao, Wang Xiangyang. Interactive Modelling on Smooth Weighted Distance Surface in HMD VR Environment[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2459-2464.

## 头戴设备 VR 环境下光滑加权等距面交互建模

朱晓强<sup>1,2</sup>, 潘虹艺<sup>1,2</sup>, 徐浩<sup>1,2</sup>, 宋磊<sup>1,2</sup>, 朱梦尧<sup>1,2</sup>, 王向阳<sup>1,2</sup>

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444; 2. 上海大学 智慧城市研究院, 上海 200444)

**摘要:** 给出一种在头戴设备 VR 环境中交互式建模机制, 通过头戴式 VR 设备手柄可输入点、线、面基本骨架, 对于给定的可变半径信息, 在 GPU 上采用 CUDA(Compute Unified Device Architecture) 并行计算带权重的距离场, 并进一步采用并行 Marching Cubes 方法提取等距面。为避免多骨架等距面交接处的不光滑性, 本建模系统采用加权滤波核函数根据骨架半径对距离场自适应光滑处理, 从而生成基于骨架的多组件光滑混合模型。系统所提供交互方式自然, 适合非专业人员的快速建模需求, 并且所生成模型具有二维流形表面特征, 可直接用于三维打印。

**关键词:** 等距面; 隐式曲面; 虚拟现实; 头戴设备; 人机交互

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 07-2459-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807004

## Interactive Modelling on Smooth Weighted Distance Surface in HMD VR Environment

Zhu Xiaoqiang<sup>1,2</sup>, Pan Hongyi<sup>1,2</sup>, Xu Hao<sup>1,2</sup>, Song Lei<sup>1,2</sup>, Zhu Mengyao<sup>1,2</sup>, Wang Xiangyang<sup>1,2</sup>

(1. School of Communication and Information, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

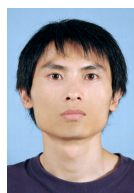
2. Institute of Smart City, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** An interactive modelling scheme in immersive VR environment is proposed, in which the *point, line and polygon skeletons are inputted by handles of HMD (Head-Mounted Device)*. Weighted distance field is calculated in parallel with CUDA on GPU according to the varying radii, and then the iso-surface is extracted using paralleled marching cubes. In order to avoid the non-smoothness at interactions between different distance surface components, weighted filtering kernels are utilized to smooth the skeleton-based distance field with various radii in our modelling system, so that smooth blending model is produced from multi-component distance fields. In our system, natural interactions suitable for non-professionals are provided to create smooth models with manifold surface which can be directly 3D printed without further post-process.

**Keywords:** distance surface; implicit surface; virtual reality; head-mounted device; human-computer interaction

## 引言

虚拟现实 VR 尽管已经出现很多年, 也越来越趋于成熟, 但仍然有较多问题亟待解决, 比如如何



收稿日期: 2017-07-30 修回日期: 2017-12-25;  
基金项目: 国家自然科学基金(61402277, 61373084),  
上海市教委科研创新项目(15ZZ044), 浙江大学  
CAD&CG 国家重点实验室开放课题(A1507);  
作者简介: 朱晓强(1984-), 男, 安徽阜阳, 博士, 讲  
师, 研究方向为计算机图形学、虚拟现实。

让头戴设备尽量满足佩戴的舒适度<sup>[1-3]</sup>。近年来, 虚拟现实 VR 不仅受到学术界的关注<sup>[4]</sup>, 也不断有诸如 HTC VIVE, Facebook Oculus 等产品化头戴 VR 设备, 并成功应用于娱乐、军事及工业等领域。

沉浸式 3D 建模系统<sup>[5-8]</sup>将用户与模型放置于同一三维空间, 用户可进行比基于草图的建模系统更加自由的交互体验。谷歌基于 HTC VIVE 头盔的三维建模工具 Tilt Brush<sup>[9]</sup>允许用户在三维空

间自由绘画彩色模型。尽管其发布时间不久,但确实是最受欢迎的应用软件之一,这充分说明了虚拟现实看到沉浸场景仅仅只是 VR 的初级应用,要想吸引用户一定要让其能够与场景有足够的互动,甚至通过自己的双手(手柄)改造甚至创建自己的三维世界。同时也充分证明了在头戴设备虚拟现实环境下创建三维模型的可行性和趣味性,不仅降低了三维建模的难度,而且将游戏的趣味性引入到建模工作中来,降低诸如传统三维建模软件如 3DS MAX、Maya 等专业建模工具的高门槛,也避免了鼠标、键盘组合建模的枯燥建模过程。

然而, Tilt Brush 只能生成离散的面片,不能够生成具有实体的三维模型,因此也就不能直接将所创建的三维模型直接 3D 打印或加工为实际物体。文献[10]给出一种基于卷积曲面的头戴设备虚拟现实环境下生成可直接三维打印的建模系统,其采用骨架驱动的具有解析计算的卷积曲面来逼近骨架的边界。本文借鉴该技术,给出基于等距面的三维建模方法,不仅能够实现多组件之间的混合加操作,而且可以实现布尔减操作,提供更丰富的建模工具,同时所采用的距离场计算也比卷积势能场更方便计算,而且可针对任何骨架。尽管多距离场交接处会出现不光滑性,本文采用了基于骨架半径的滤波策略<sup>[11]</sup>能够有效生成处处连续变化的距离场并基于并行 Marching Cubes 提取光滑的等距面。

2013 年被称为 3D 打印元年,而 2016 年被称为 VR 虚拟现实技术的元年,如果说 3D 打印是颠覆制造业的,那么 VR 就是颠覆娱乐业的,而且这两个行业都正在普及到普通消费者家中。对于普通消费者来说创建 3D 可打印的三维模型是困难的,甚至是枯燥乏味的过程,因此如何将 VR 的趣味性带到 3D 可打印模型的创建过程中,不仅能够推动 3D 打印的快速普及,也将 VR 的应用从娱乐行业拓展到更为实用的制造领域,更是两个行业相互推动发展的过程,这也是本文系统的主要出发点。

## 1 系统概述

本文系统以 HTC VIVE 头戴 VR 设备为实验平

台,研究基于距离场的隐式曲面建模方法,所建立的模型具有二维流形表面,可直接用于 3D 打印。

系统根据用户 VR 手柄的输入,分别将点、线、面等骨架传到 GPU 用于计算可变权重的距离场,对于多个组件生成的距离场可并行计算其加、减组合,从而生成变化多样的复合模型。为减少等距面离散提取所造成的锯齿走样现象,系统采用低通滤波将离散复合距离场转换为处处变化连续的距离场,并用于等值面的提取,生成光滑的基于骨架的等距面。

## 2 基于骨架的可变权重距离场

对于点、线、面骨架,根据用户输入的半径信息,生成对应的距离场,并确保最终提取的单一阈值等距面逼近可变半径的骨架形状。为统一所有骨架的等距面提取,默认提取阈值为 1 的等值面,针对半径不同的骨架输入,通过缩放距离场来达到逼近骨架形状。

### 2.1 点骨架

空间任一点  $P$  到半径为  $R$  的点骨架  $V$  的距离计算直接采用欧式距离计算即可:

$$d = |V - P|/R \quad (1)$$

### 2.2 线骨架

如图 1 所示,两端半径分别为  $R_1$  和  $R_2$  的线段骨架  $V_1V_2$ ,对于空间任意点  $P$ ,其到线段的加权距离值根据其到直线  $V_1V_2$  的垂足位置分别用不同计算方法。

(1) 如  $P_2$ ,若垂足  $O_2$  在线段  $V_1V_2$  之间其距离势能值为

$$d_{P_2} = \frac{|P_2O_2|}{\frac{|O_2V_2|}{|V_1V_2|}R_1 + \frac{|V_1O_2|}{|V_1V_2|}R_2} \quad (2)$$

(2) 如  $P_1$ (或  $P_3$ ),若垂足  $O_1$ (或  $O_3$ )在线段  $V_1V_2$  外侧,则其距离势能值为

$$d_{P_1} = \frac{|P_1V_1|}{R_1}, d_{P_3} = \frac{|P_3V_3|}{R_2} \quad (3)$$

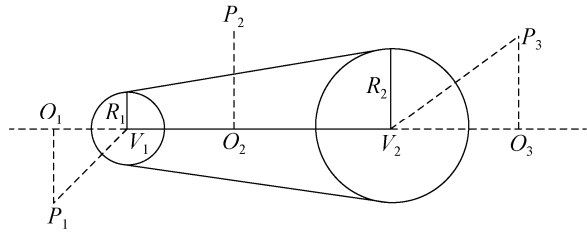


图 1 线骨架距离场  
Fig. 1 Line skeleton-based distance field

### 2.3 多边形面骨架

对于平面  $N$  边形  $Q$ , 其顶点  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$ , 各顶点半径分别为  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$ , 如图 2 所示。空间任一点  $P$ , 根据其到多边形所在平面垂足的位置, 分别计算到多边形的距离。

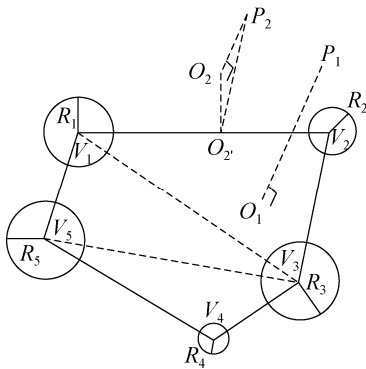


图 2 平面多边形骨架距离场  
Fig. 2 Planar polygon skeleton-based distance field

(1) 若垂足在多边形内, 如  $P_1$  的垂足  $O_1$ , 首先计算  $O_1$  在平面多边形  $Q$  内的重心坐标,

$$O_1 = \sum_{i=1}^N w_i V_i \quad (4)$$

则  $P_1$  到  $Q$  的加权距离为

$$d_{P_1} = |P_1 O_1| \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (5)$$

(2) 若垂足在多边形外, 如  $P_2$  的垂足  $O_2$ , 则根据公式(2)和公式(3)分别计算  $P_2$  到多边形各边的距离  $d_i (i=1, 2, \dots, N)$ , 则  $P_2$  到  $Q$  的加权距离为

$$d_{P_2} = \min_{i=1}^N \{d_i\} \quad (6)$$

### 2.4 体骨架

表面封闭二维流形网格  $M$  将三维空间分为三部分:  $M$  内部  $V$ 、 $M$  和  $M$  外部  $\tilde{V}$ 。针对三维空间

任一点  $P$ , 计算其到  $M$  距离  $d$

$$d = \begin{cases} 1 - |PM| & P \in V \\ 1 & P \in M \\ 1 + |PM| & P \in \tilde{V} \end{cases} \quad (7)$$

## 3 复合离散距离场计算与滤波

### 3.1 复合离散距离场计算

当空间中导入多个骨架时, 有加法和减法两种布尔操作。加法可使空间中生成多个骨架等距面的混合和叠加效果, 减法是在原来骨架等距面的基础上进行“挖洞”操作。

当进行加法操作时, 每输入一个新骨架  $Skel_i$ , 对于均匀采样网格  $Grid_{m \times m \times m}$  离散距离场  $DistField$ , 空间采样点  $j (1 \leq j \leq m \times m \times m)$  的最终距离场值取当前骨架距离值  $DistField_{ji}$  与原距离值  $DistField_j$  的较小者, 实现当前骨架距离场与原距离场的叠加:

$$DistField_j = \min \{DistField_j, DistField_{ji}\} \quad (8)$$

当进行减法操作时, 空间中各个点的势能值更新情况如图 3 所示。

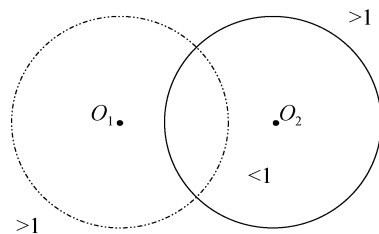


图 3 距离场减法操作  
Fig. 3 Distance field subtraction

以点骨架模型为例,  $O_2$  为空间中原有的球体模型,  $O_1$  为当前导入的球体模型, 要将  $O_2$  中与  $O_1$  相交的部分消去。从距离势能场角度来看,  $O_2$  之外的点的距离值原本就大于 1, 将其保持。筛选出同属于两球的网格点, 将其原来小于等于 1 的势能值变为大于等于 1, 即任一空间点  $P$  距离计算如下:

$$DistField_P = \begin{cases} 2 - \frac{|PO_1|}{R_1} & |PO_1| < R_1 \text{ 且 } DistField_P < 1 \\ DistField_P & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

### 3.2 离散距离场滤波

多组件的距离场, 相交面会有锯齿状和凹凸不平的现象, 尤其对于减法操作, 本文采用  $3 \times 3 \times 3$  和  $5 \times 5 \times 5$  两种精度滤波模板进行离散距离场滤波。

以 27 点低通滤波为例, 选取空间  $P$  点紧密围绕的 27 个点(边界处点特殊处理), 依照距离  $P$  点越近权值越高的原则, 计算  $P$  点周围 27 个点(包括  $P$  点)每个点对  $P$  点势能距离场的影响权值。

$$\text{DistField}_p = \sum_{i=1}^{27} w_i \text{DistField}_i \quad (10)$$

### 4 等值(距)面提取

根据上一节计算的均匀采样网格  $\text{Grid}_{m \times m \times m}$  离散距离场  $\text{DistField}$ , 本节将介绍基于 CUDA 并行化等值面提取方法。

步骤 1(边标记): 根据  $\text{Grid}_{m \times m \times m}$  每条棱  $e$  的两端点处  $v_1, v_2$  的距离值  $\text{DistField}_{v_1}, \text{DistField}_{v_2}$  与阈值 1 的大小关系, 标记  $e$  是否与等距面  $S$  相交。即  $\text{DistField}_{v_1} - 1, \text{DistField}_{v_2} - 1$  同号(异号), 则  $e$  与  $S$  无交点(有交点)。

步骤 2(边压缩): 采用 thrust 库中并行规约算法 ThrustScanWrapper 将边数组压缩存储, 只保留有交点的边, 然后并行计算边与  $S$  的交点位置并压缩存储。

步骤 3(Cube 标记): 类似步骤 1, 根据  $\text{Grid}_{m \times m \times m}$  每个 Cube 的 8 个端点处的距离值与阈值 1 的大小关系, 标记 Cube 是否与等距面  $S$  相交。即 8 个  $\text{DistField}_{v_i} - 1$  同号(异号), 则 Cube 与  $S$  无交点(有交点)。

步骤 4(Cube 压缩): 类似步骤 2, 采用 thrust 库中并行规约算法 ThrustScanWrapper 将 Cube 数组压缩存储, 只保留有交点的 Cube。

步骤 5( $S$  提取): 在每个 Cube 中根据当前 8 个顶点处  $\text{DistField}_{v_i} - 1$  的符号组合, 并行提取等值面三角形, 其中三角形顶点位置已经由步骤 2 中求取并压缩存储。

## 5 实验结果与分析

本文建模系统基于 OpenVR 软件 SDK, 硬件采用 HTC VIVE 头盔, 运行计算平台为桌面 PC, 4.0 GHZ Intel i7-6700K CPU、8G 内存、Nvidia GTX 1070 显卡。在  $200 \times 200 \times 200$  的 Marching Cubes 分辨率下, 借助 CUDA 的并行加速, 可实现交互建模实时流畅。交互方式下, 主要通过 3 种骨架(点、线、面)的 2 类组合方式(加、减)来创建复杂复合模型, 并且各种骨架可以通过拇指滑动触摸板方便随时切换。

单独点骨架生成的等距面为以点为球心的球面。单段线骨架生成圆柱加上两端的半球, 当每个端点有不同的半径时, 加权等距面计算为半径变化的圆台加上两端的半球, 多点的折线段形成多个圆台和多个半球的并集, 如图 4 所示。如图 5 所示, 半径不同的多边形面骨架, 由各端点高度不能的棱台、沿边界线的半径不等的半圆台、以及各顶点处半径不同的半球的并集组成。

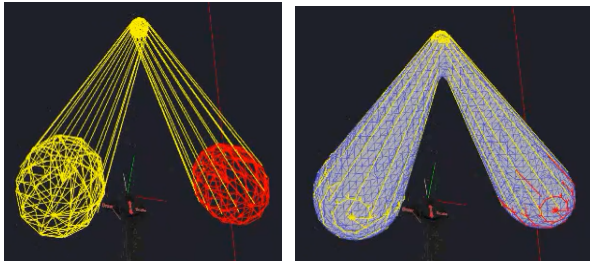
多骨架组成的复合距离场, 能够自动处理复杂拓扑模型, 可借助点、线、面骨架的任意次序的加操作将多个距离场进行混合并生产无缝曲面, 经过减运算可以在现有模型基础上任意挖洞, 从而满足用户建模需求, 如图 6~9<sup>[13]</sup>所示。

多组件生成的距离场, 在交界处距离变化是不光滑的, 在离散采样的 Marching Cubes 算法提取等距面时, 无论是通过加操作还是减操作都会生成锯齿走样, 尤其针对减运算更加明显, 如图 10 所示。经过低通滤波后的距离场能够明显避免距离场突变, 改善所提取等距面的光滑性, 如图 6~9 所示。

本系统提供的三种简单骨架都可作为加、减元素, 同时也都可以作为扫描操作的笔刷形状, 因此可以根据需要, 自由组成成多种形状。针对非专业用户, 不需进行学习, 可直接通过手柄在 VR 沉浸环境下挥动笔刷, 只需要几分钟即可快速建模三维模型, 如图 11 所示。

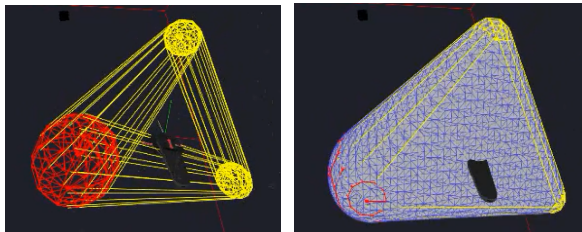
为提供用户复杂模型更便捷的生成方式, 系统支持从外部导入模型, 将其视为实体骨架, 基于该体骨架计算有向距离场并滤波, 提取等距

面, 从而将导入的显式网格转化为基于距离场的隐式曲面, 而且可用上述 3 种简单骨架对该距离场进一步修改, 在现有模型基础上进行二次创作, 加速建模过程并降低建模难度, 如图 12 所示。



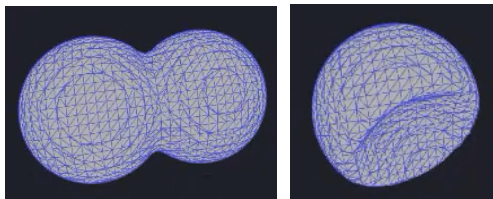
(a) 线骨架 (b) 线骨架等距面

图 4 线骨架  
Fig. 4 Line skeleton



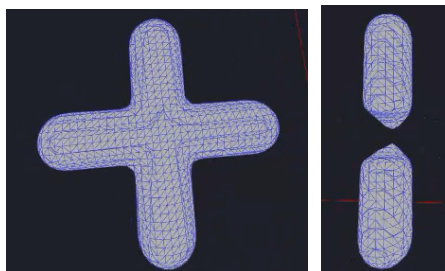
(a) 面骨架 (b) 面骨架等距面

图 5 面骨架  
Fig. 5 Area skeleton



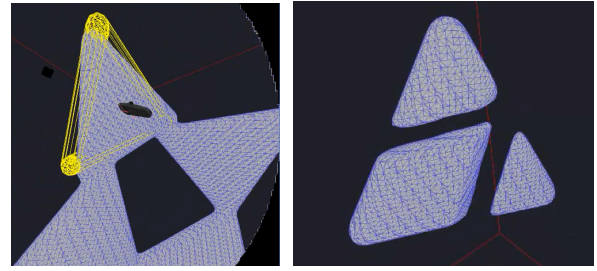
(a) 加运算 (b) 减运算

图 6 点骨架的加减运算  
Fig. 6 Point skeleton-based add/subtract



(a) 加运算 (b) 减运算

图 7 线骨架的加减运算  
Fig. 7 Line skeleton-based add/subtract



(a) 加运算 (b) 减运算

图 8 面骨架的加减运算  
Fig. 8 Area skeleton-based add/subtract

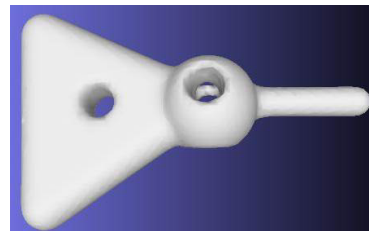
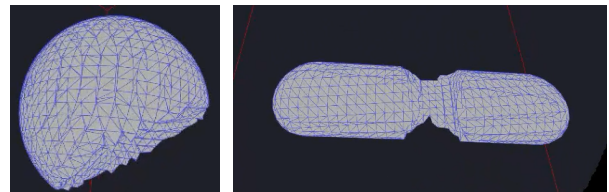
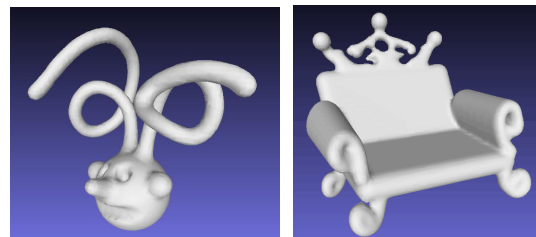


图 9 复合骨架的加减运算  
Fig. 9 Compound skeleton-based add/subtract

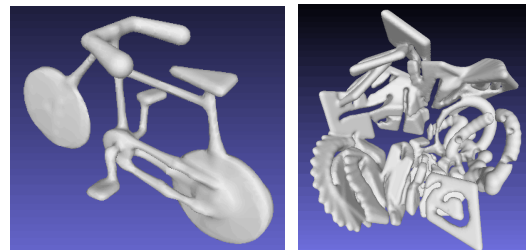


(a) 点骨架减运算 (b) 线骨架减运算

图 10 未经滤波的减运算造成的锯齿走样  
Fig. 10 Aliasing from subtraction without filtering



(a) 人头 (b) 椅子



(c) 自行车 (d) 复杂拓扑模型

图 11 使用本文系统建模效果  
Fig. 11 Created shapes by our modeling system

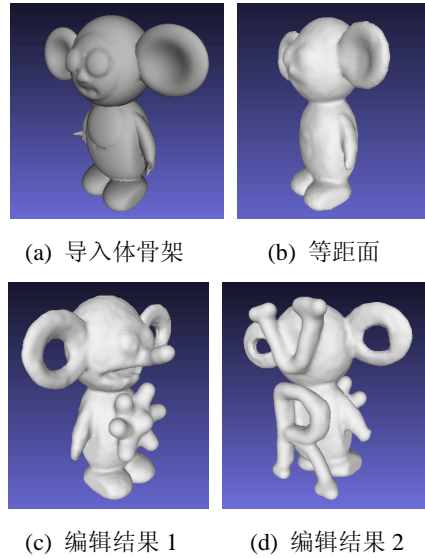


图 12 基于导入体骨架的二次模型编辑

Fig. 12 Secondary model edit based on volume skeleton

## 6 结论

本文给出一种在头戴设备环境下的交互建模方法，所采用的基于点、线、面的距离场能够方便表达用户建模意图。各组件之间的拼接和挖洞操作可任意组合，可表示各种变化拓扑的三维模型。借助距离场的低通滤波可避免多组件相交过渡的锯齿走样，最终得到的光滑二维流形可直接用于 3D 打印。

然而本文算法仍有一定局限性，由于距离场的滤波和 Marching Cubes 离散等距面提取，使得模型只是对用户意图的近似，而非完全插值。对于现有模型组件的精确组合，可采用文献[14-15]中的精确布尔运算，尽管精确布尔运算速度较慢，可借鉴 GPU 并行布尔运算<sup>[16]</sup>，这些可作为本系统的下一步工作借鉴方向。

## 参考文献:

- [1] Koulieris G A, Bui B, Banks M S, et al. Accommodation and comfort in head-mounted displays[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2017, 36(4): 87.
- [2] Konrad R, Padmanaban N, Molner K, et al. Accommodation-invariant computational near-eye displays [J]. ACM Transactions on Graphics(S0730-0301), 2017, 36(4): 88.
- [3] 肖翱, 徐枫, 雍俊海, 等. 针对虚拟现实眼镜的近/远视反卷积矫正算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(7): 1169-1176.  
Xiao A, Xu F, Yong J H, et al. A fast deconvolution algorithm for correcting myopia/hyperopia in head mounted display [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(7): 1169-1176.
- [4] Pick S, Weyers B, Hentschel B, et al. Design and evaluation of data annotation workflows for CAVE-like virtual environments [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics(S1077-2626), 2016, 22(4): 1452-1461.
- [5] Wesche G, Seidel H P. Freedrawer: A free-form sketching system on the responsive workbench[C]. VRST, 2001: 167-174.
- [6] Keefe D F, Feliz D A, Moscovich T, et al. Cavepainting: A fully immersive 3D artistic medium and interactive experience[C]//Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics. SI3D, 2001: 85-93.
- [7] Keefe D F, Zeleznik R C, Laidlaw D H. Drawing on air: Input techniques for controlled 3D line illustration[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2007, 13(5): 1067-1081.
- [8] Jackson B, Keefe D F. Lift-off: Using reference imagery and freehand sketching to create 3D models in VR. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2016, 22(4): 1442-1451.
- [9] Google's Tilt Brush. Available from[DB/OL] (2016) www.tiltbrush.com.
- [10] Zhu X, Song L, You L, et al. Brush2Model: Convolution surface-based brushes for 3D modelling in HMD-based virtual environments[J/OL]. Computer Animation and Virtual Worlds(S1546-427X), 2017, 28(3/4): e1764.1-10. https://doi.org/10.1002/cav.1764
- [11] Mathieu Sanchez, Oleg Fryazinov, Pierre-Alain Fayolle, et al. Convolution Filtering of Continuous Signed Distance Fields for Polygonal Meshes[J]. Computer Graphics Forum (S0167-7055), 2015, 34(6): 277-288.
- [12] 毕硕本, 陆源, 曾晓文, 等. Marching Cubes 改进算法及其气象三维模拟[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(7): 1405-1410, 1418.  
Bi Shuoben, Lu Yuan, Zeng Xiaowen, et al. Improved marching cubes algorithm and its three-dimensional meteorological simulation [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(7): 1405-1410, 1418.
- [13] Cignoni P, Callieri M, Corsini M, et al. MeshLab: an open-source mesh processing tool[C/OL]//Sixth Eurographics Italian Chapter Conference. 2008: 129-136. http://www.meshlab.net/
- [14] Jacobson A, Panozzo D. libigl: a simple C++ geometry processing library [DB/OL]. [2017] http://libigl.github.io/libigl/
- [15] Zhou Q, Grinspun E, Zorin D, et al. Mesh arrangements for solid geometry[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2016, 35(4): 39.
- [16] Zhao H, Wang C C, Chen Y, et al. Parallel and efficient boolean on polygonal solids[J]. The Visual Computer (S0178-2789), 2011, 27(6/8): 507-517.