

应用于增强 / 虚拟现实中的模型简化

刘舒婷^{1,2} 付楠¹ 余绍德¹ 张立² 谢耀钦¹

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(东北大学中荷生物医学与信息工程学院 沈阳 110819)

摘 要 随着计算机图形学的发展,应用于增强/虚拟现实的模型日趋复杂。为了更好地展示出模型的细节同时保证帧率,需要强大的硬件设备或者低复杂度的模型。实际应用中往往选择后者,降低模型的精细度来保障增强/虚拟现实的实时性成了一个挑战。文章提出了基于贪心算法和拉普拉斯平滑处理的模型简化和优化方法。实验结果表明,在简化相同百分比时,这种方法失真度更小,可以更好地满足增强/虚拟现实设备的实时性。

关键词 模型简化; 增强现实; 虚拟现实

中图分类号 TU 205 **文献标志码** A

The Model Simplification Applied to Augmented Reality and Virtual Reality

LIU Shuting^{1,2} FU Nan¹ YU Shaode¹ ZHANG Li² XIE Yaoqin¹

¹(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(Sino-Dutch Biomedical and Information Engineering School, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract With the development of computer graphics, the models applied to augmented reality (AR) / virtual reality (VR) tend to be more complicated. Highly detailed representation without reducing frame rate either requires powerful computing devices or models with low complexity. The latter one is usually a more practical choice. Reducing the fineness of model to protect the AR/VR in real-time becomes a challenge. In this paper, a new method based on greedy assignment and Laplacian smoothing algorithm was introduced. Experimental results demonstrate that the proposed method has the least distortion under the same ratio of simplification, and can better meet the real-time requirements of AR/VR.

Keywords model simplification; augmented reality; virtual reality

收稿日期: 2016-10-09 修回日期: 2016-11-26

基金项目: 广东省创新研究团队项目(2011S013); 国家重点研发计划(2016YFC0105102); 深圳市技术攻关项目(JSGG20160229203812944)

作者简介: 刘舒婷, 本科, 研究方向为生物医学工程; 付楠, 硕士, 研究助理, 研究方向为增强现实在图像引导中的应用; 余绍德, 博士, 助理研究员, 研究方向为医学影像处理和模式识别; 张立, 硕士, 中级实验师, 研究方向为生物医学工程; 谢耀钦(通讯作者), 研究员, 博士研究生导师, 研究方向为图像引导放射治疗、医学影像处理和分析、医学物理, E-mail: yq.xie@siat.ac.cn。

1 引言

随着科学技术的发展,增强现实和虚拟现实成为当今时代较为火热的话题之一。该技术在医疗研究、解剖训练、精密仪器制造、装配与维修、军事训练、工程设计及远程机器人等领域有着巨大的应用前景^[1]。

增强/虚拟现实系统中的模型是整个系统建立的基础。为给用户创造身临其境的感受,需要创建尽可能逼真的模型、场景。但是,随着增强/虚拟现实、计算机图形学等科学技术的不断发展,模型逐步精细化,使得模型数据非常庞大而且很复杂,通常模型由成万上亿个三角面网格组成。这样庞大的数据将会给增强/虚拟现实系统的实时响应机制带来沉重的内存负担。在实验过程中,对于复杂的模型,设备经常出现不能呈现完整模型、模型建立的位置与设定的位置不一致、模型间歇性抖动等由于硬件设备性能导致的延迟及错误。因此,对于增强/虚拟现实系统中的模型,应该在保证其图像显示质量的前提下将其模型数据量尽可能地减少。

将低精度的模型发布到最新的增强现实设备(HoloLens),HoloLens运行正常且可以在预设的地点完整地呈现模型。但是,对于高精度的模型,HoloLens会出现模型只有部分显示、模型位置错移、模型抖动等一系列的问题。针对这个问题,需要在保证模型质量的前提下,缩减模型数据量,这里主要是指模型的顶点数和三角形面数。

目前,3dsMAX是常用的模型精简工具。它是由Discreet公司开发的(后被Autodesk公司合并)基于PC系统的三维动画渲染和制作软件。它有专用的编辑器可以对模型进行编辑。编辑器MultiRes可以对物体质量百分比进行编辑,找到MultiRes(编译器)后,点击Generate(产生)按钮后能够对vert Percent(顶点百分比)进行编辑,

随着设置百分比数值的减少,物体的线条变少,原则上应在保持模型基本不变的情况下,将模型的顶点数降低。虽然这种方法可以达到简化的效果,但它不能保证简化的质量,模型在大量精简后会出现失真的现象。

此外,在增强/虚拟现实系统中,为减少精细模型带给设备造成的负担,通常把高精度模型的照片做成纹理,添加附着在低精度的模型上面,但通过这种方法简化后的模型应用于设备时会出现模型的立体效果不明显的问题。

本文旨在探索如何在保证模型质量的前提下,对模型进行精简,并更好地应用于增强/虚拟现实系统。

2 模型简化原理

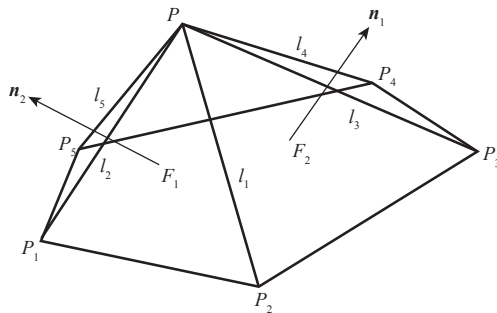
增强/虚拟现实的模型通常是由许多三角网格构成的,因此对模型的简化实质是对三角网格合并。我们以三角网格简化技术为基础进行改进,引入3D模型简化忍受因子,得到简化形态的可接受阈值区间,并采用贪心算法^[2]的思想,通过求解局部简化最优解,实现在尽可能保持3D模型空间拓扑结构的前提下,对其进行简化并进行平滑处理。

2.1 三角网格数据

根据三角网格数据结构的特点,可以将模型的网格数据表示为 $M=(P, L, F)$,如图1所示, P 表示顶点集合、 L 表示三角面的边缘线集合、 F 表示三角面集合。其中,网格中的一个顶点 i 可以表示为 $P_i=(x_i, y_i, z_i)$;网格中的一条边缘线 k 可以表示为 $L_k=(V_i, V_j)$;网格中的一个面 q 可以表示为 $F_q=(V_i, V_j, V_k)$ 。如图2所示,在三维三角网格数据中,每一个点可以被多个线、面共有,而每一条线最多有两个共用面。

2.2 简化忍受因子 β 的提出

在欧式距离 D_E 中,点 P_0 到集合 S 的距离定



注: P 为点; l 代表线; F 为三角面; n 为面法向量

图 1 三角网格数据概念图

Fig. 1 Triangular mesh structure concept map

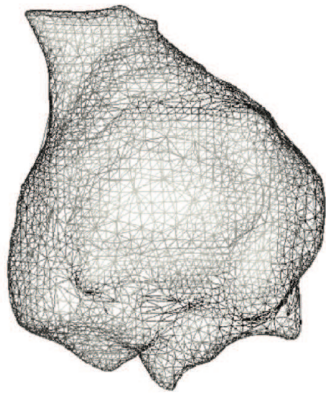


图 2 三维三角网格数据模型(结节)

Fig. 2 3D triangular mesh model of nodules

义为公式(1)。同样,两个集合 X 、 Y 之间的距离定义为公式(2),可以得到两个集合的欧式距离就是两者的最短距离,其有良好的对称性,见公式(3)。但其对称性导致集合中太多的信息得不到表达,如集合的形状和位置分布信息(如图 3 所示)。

$$D_E(P_0, S) = \inf_{y \in S} d(P_0, y) \quad (1)$$

$$D_E(X, Y) = \inf_{x \in X} \inf_{y \in Y} d(x, y) \quad (2)$$

$$D_E(X, Y) = D_E(Y, X) \quad (3)$$

Hausdorff 距离^[3]很好地解决了这两种情况。Hausdorff 距离 D_h 指的是某一集合到另一集合最近点的所有距离中的最大值,见公式(4),具有方向性,见公式(5)。通过一定的变换,在保留其原有特性的基础上,使其满足对称性,见公式

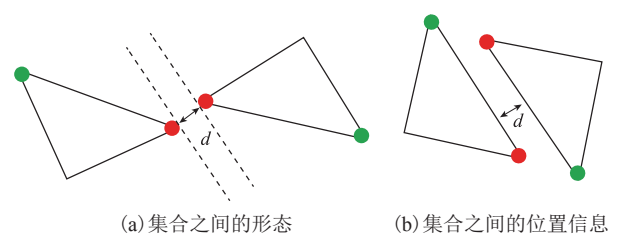


图 3 欧式距离无法表达的两种信息情况

Fig. 3 The disadvantage of Euclidean distance

(6), 这样将得到公式(7)。

$$D_0(X, Y) = \sup_{P_0 \in X} D_E(P_0, Y) \quad (4)$$

$$D_0(X, Y) \neq D_0(Y, X) \quad (5)$$

$$D_h(X, Y) = \max[D_0(X, Y), D_0(Y, X)] \quad (6)$$

$$D_h(X, Y) = 0 \Leftrightarrow X = Y \quad (7)$$

通过公式(7)可知,当两个图形的形态相近时, $D_h(X, Y) \rightarrow 0$ 。模型简化是在原来的基础上简化,不是两个完全独立的个体,所以对于未简化的原模型 M_0 和简化后的模型 M_1 之间一定满足 $D_h(M_0, M_1) \leq \psi(M_0)$ 。其中, $\psi(M_0)$ 表示 M_0 的最长对角线距离。由此可以推导出简化过程中可接受范围为 $[0, \lambda]$, $\lambda = \psi(M_0) \times \beta$, 通过 β 值的设定来保证该简化方法对模型拓扑结构的鲁棒性。

2.3 简化模式

对三角网格数据的简化实际是将一些相近的面进行合并,而边塌陷算法^[4]是一种比较简单、通用的模型处理方法,它是通过折叠的方式来实现减少顶点和三角形的目标。

因为每一条线最多有两个面共用,所以通过折叠不会引起过多面片的更新。其原理是在原模型 M_0 中选择一条边 l_0 , 并获取 l_0 的两个顶点 u 、 v , 获取三角网格中以点 (u, v) 为中心的一阶拓扑结构 m_0 , 在此结构上进行边塌陷以及相应的线面修改(如图 4 所示)。

我们在此基础上进行适当的调整,对数据结构进行了重新布局,将三角网格中的点线面进行

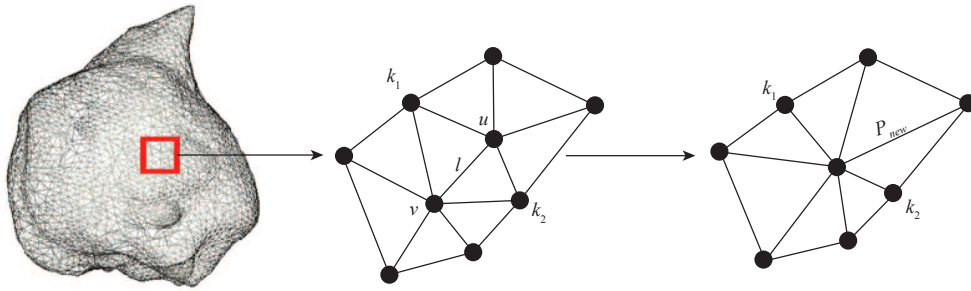


图4 模型简化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of model simplification

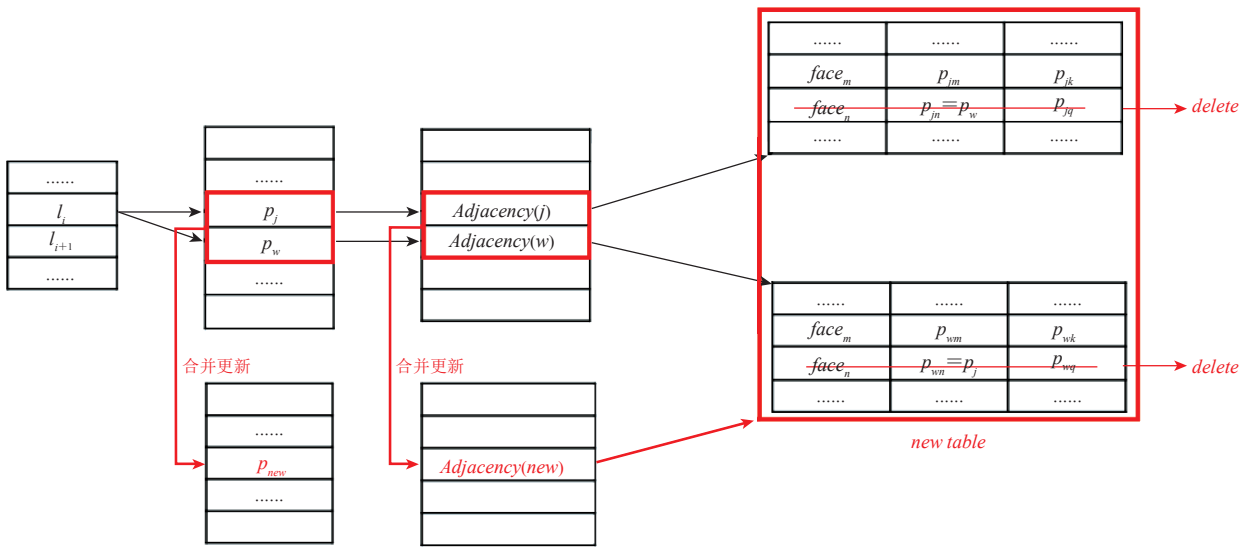


图5 存储模式图

Fig. 5 Storage pattern

了如图5存储。

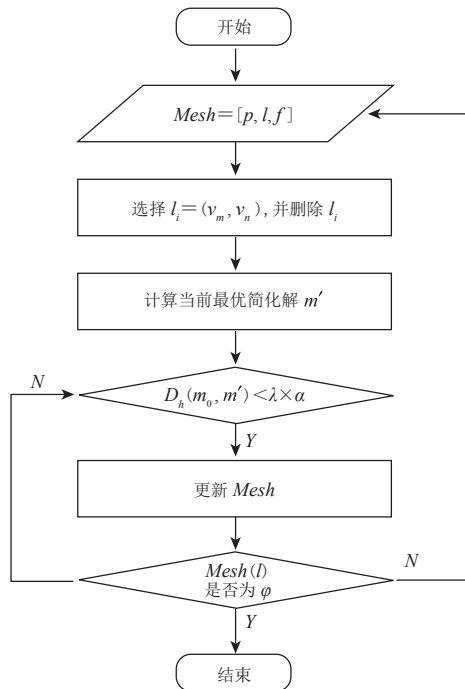
在对顶点 u 、 v 合并过程中，在两点连线上进行恒定步长的新点 p_i 位置探测，得到新的局部拓扑结构 m_i ，计算 $D_h(m_0, m_i)$ ，寻找与原拓扑结构最相似的结构 m' ，记 $min = D_h(m_0, m')$ 。若 $min > \lambda \times \alpha$ (α 为简化系数， $\alpha \in [0, 1]$)，则放弃进行简化修改，并将其从 L 集合中删除；若 $min \leq \lambda \times \alpha$ ，更新 m_0 ，令 $m' = m_i$ 并将 u 、 v 两点合并为一点 p_{min} ，修改合并原 u 、 v 的邻接矩阵，重复上次操作直至 L 集合为空集^[5]。

如图6所示，首先获取三维拓扑结构 $M_0 = [p, l, f]$ 和 L_0 边集合，从 L_0 边集合中删除边 $l_i =$

$[P_j, P_w]$ ，在 l_i 边上，寻求最优的替代点 P_{new} ，得到一个新的拓扑结构 M' 。然后，计算两个拓扑结构的 Haudorff 距离 $D_h(M_0, M')$ 。若达到满意程度(满足约束式)，则更新当前的拓扑结构，即 $M_0 = M'$ ；若没有达到满意程度，则判断 L_0 边集合是否为空，即该集合的边已全遍历，若为空，则输出简化后的拓扑结构，否则，再次从 L_0 边集合中删除边 $l_i = [P_j, P_w]$ 。

2.4 拉普拉斯平滑

对于三维的三角网格模型，经过模型点删除简化后，很大程度上控制了数据点的冗余度，达到了预期精简模型的目的。但同时使得模型上的



注: $D_h(m_0, m')$ 为 Hausdorff 距离; λ 为简化阈值; α 为简化百分比

图 6 模型简化流程图

Fig. 6 Model simplified flow chart

一些细节被去掉, 导致模型表面光滑度降低, 而在增强/虚拟现实过程中为更逼近现实, 对模型的表面光滑度也提出较高的要求, 从而需要对网格数据进行曲面光滑处理, 以达到更好的显示效果。

从 Fourier 变换来看, 平滑处理就是去掉那些不满足条件的高频信号, 如对于一个二维数据图像, 如果图像含有噪声, 或者色彩变化剧烈, 就说明其不够平滑。拉普拉斯算子就好比一个滤波器, 可以滤掉高频噪声, 也就是剧烈变化的部

分, 使得整幅图像变得平滑。对于 Mesh 数据, 就是磨掉那些明显的棱角。

对每一个点进行拓扑和几何分析, 获知哪些点与该点直接连接, 哪些三角面由该点构成, 从而对每一个点组建一个点连接数组 (存储那些直接相连接的点), 如图 7 所示。

简单的拉普拉斯平滑算法^[6]的原理是将每个顶点都移动到相邻顶点的平均位置。具体的计算公式为: $U(P) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Position(p_i)$, 如图 8 所示。

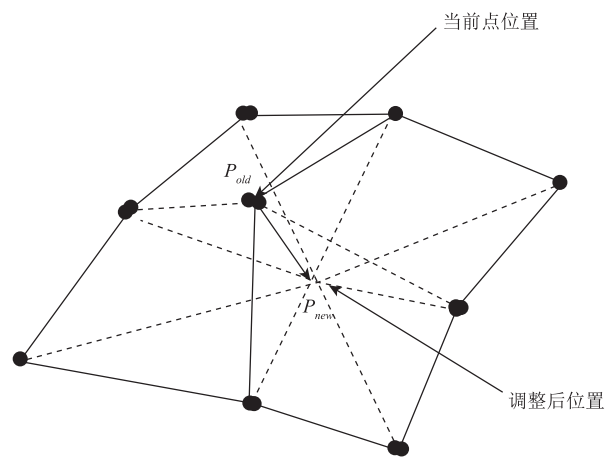


图 8 拉普拉斯平滑处理 (点位调整)

Fig. 8 Laplace smoothing

在拉普拉斯平滑算法有很多进一步的变形, 首先在求取平均位置时, 可以采用不同的加权策略, 如对不同的邻接点采用不同的权值。一般来说, 距离中心点 P 较远的邻接点, 我们可以让它对 P 平滑后的位置影响小一点。这样就可以采用

p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_n
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}	p_{15}	p_{1n}
p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{24}	p_{25}	p_{2n}
.....
p_{n1}	p_{n2}	p_{n3}	p_{n4}	p_{n5}	p_{nm}

图 7 点邻接矩阵

Fig. 7 Adjacency matrix of points

一种距离的倒数为权值的拉普拉斯平滑。

$$U(P) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sum w_i} w_i \text{Position}(p_i) \quad (8)$$

$$w_i = \|P - p_i\|^{-1}$$

有时为了控制平滑的速率，也会引入参数 λ 来控制平滑的速率：

$$P_{new} = P_{old} + \lambda [U(P) - P_{old}] \quad \lambda \in [0, 1] \quad (9)$$

平滑算法往往可以反复对 Mesh 执行，使得 Mesh 越来越光滑，迭代次数 Iterations 也是平滑

算法中重要的参数。

3 实验与验证

用贪心算法对模型进行不同程度的简化处理和光滑处理，并将处理的结果和 3dsMAX 的简化效果进行对比，结果如图 9 和图 10 所示。

如图 9 所示，从左到右分别对应头颅的原图、简化 50%、简化 75% 和简化 95% 后的模

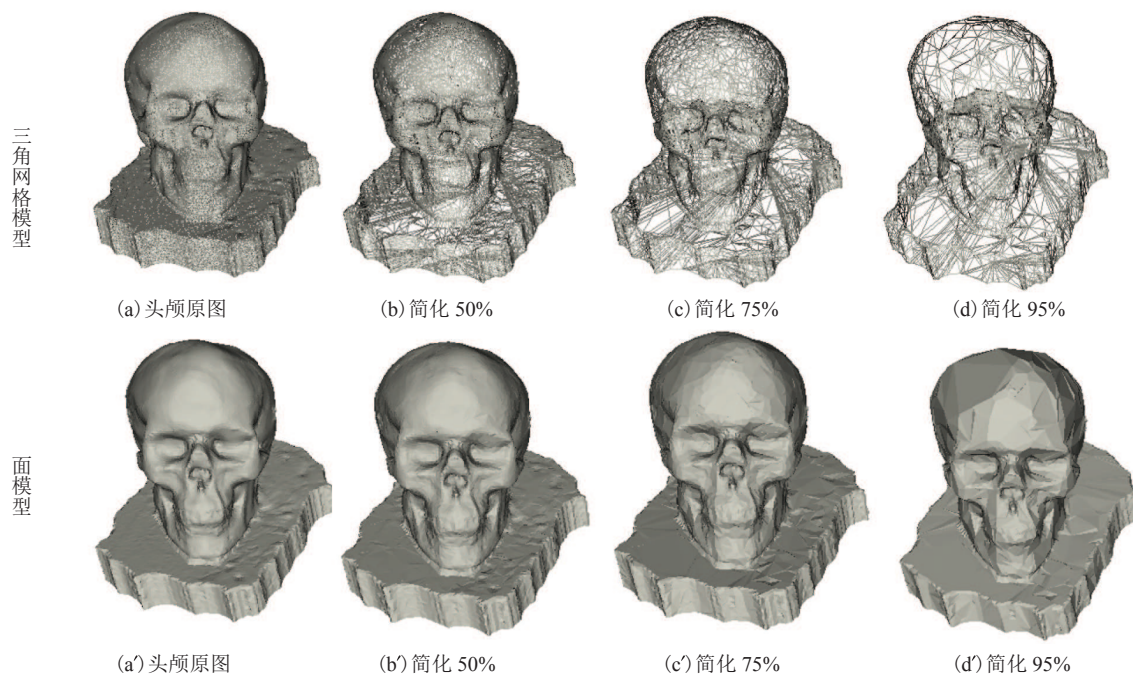


图 9 简化对比图

Fig. 9 Simplified comparison

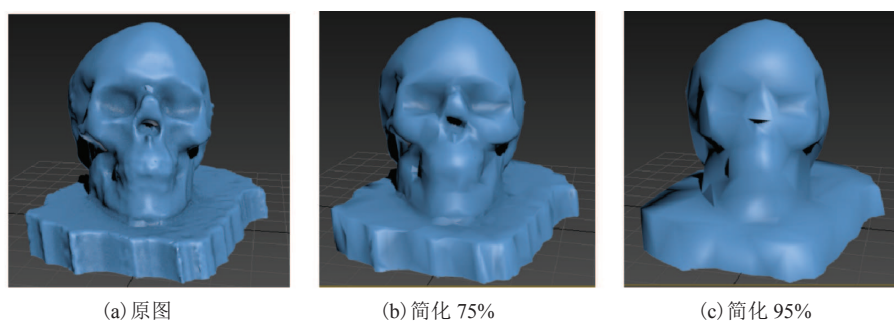


图 10 3Dmax 简化工具导致过简化失真效果

Fig. 10 3DMax's simplify will lead to a excess simplification and distortion effect

型, 第一行是三角网格模型简化效果对比, 第二行是面模型简化效果对比。模型在简化过程中, 极大地保持了模型的特征。简化 50% 后和原模型比较, 基本没有变化; 简化 75% 和简化 95% 后和原模型比较, 头顶不如原来那样光滑, 但依然极大保留着原来模型的特征。与 3dsMAX 的简化效果(图 10)对比, 这种简化方法在眼部和嘴部保留了更多的细节, 模型简化失真度更小。

如图 11 所示, 从左到右分别是结节的原图、拉普拉斯光滑迭代 250 次、拉普拉斯光滑迭代 500 次和拉普拉斯光滑迭代 1 000 次后的效果图。随着迭代次数的增加, 光滑的效果不断提高。拉普拉斯的光滑迭代可以对已精简后模型中不平滑部分进行改善, 更大程度上保证模型的质量。

4 讨论

传统的模型简化方法在大量精简后会出现较明显模型失真的现象。例如, 三角面削减算法(Decimation of Triangle Meshes)^[7], 假设在不破坏周边区域拓扑结构的情况下, 对顶点以及相关的三角片进行删除, 并对由于删除产生的空洞进行重新三角化。由于简化后的模型顶点集是原模型顶点集的一个子集合, 虽然能够很好地利用原始的顶点属性数据, 但使得模型容易失真。对于 STereo Lithograph 模型文件, 还可以通过减少某些区域存在一些狭长的钝角三角形, 实现节省文

件存储空间和后续数据处理时间。通常情况下, 钝角三角形对模型逼近误差的影响非常小, 因此可以把不必要的钝角三角形删除^[8]。但这种简化方法受到了钝角三角形个数的影响, 在钝角三角形数量不多的情况下, 模型得不到很好的削减。Quadric Error Metrics(QEM)算法^[9]是对多个三角面的公共顶点赋予一个误差属性, 顶点误差定义为该点到这组平面的平方距离之和, 然后依据误差大小来排序, 选择待收缩边。这种误差定义可以比较好地保证模型的整体形态, 是一种兼顾效率和质量的方案。

目前大部分三角面简化算法都是基于 Garland 算法进行的改进^[10,11]。我们首先与传统的 Garland 的 QEM 运行效果和目前商业软件中的简化效果进行了对比。参考结果中的图 9、图 10 和图 11、图 12、图 13 进行对比。从图 12 和图 13 可以发现, 两者都存在过度简化导致模型失真现象。

Garland 方法是兼顾效率和质量, 尽管该方法进行了对模型整体形态的控制, 以防止模型失真, 但在兼顾两者情况下, 仍无法达到单纯简化一方最优。在 2016 年, 一篇基于特征保持的网格简化算法研究的文章提出了一种基于二次误差测度的网格简化算法^[12], 该算法弥补了传统的基于局部特征的网格算法的缺点, 使得算法在简化中更有效地保持网格的全局特征。由图 11 发现其简化确实有所改善, 但最终仍然无法抑制在过度简化操作中引起的模型失真现象。

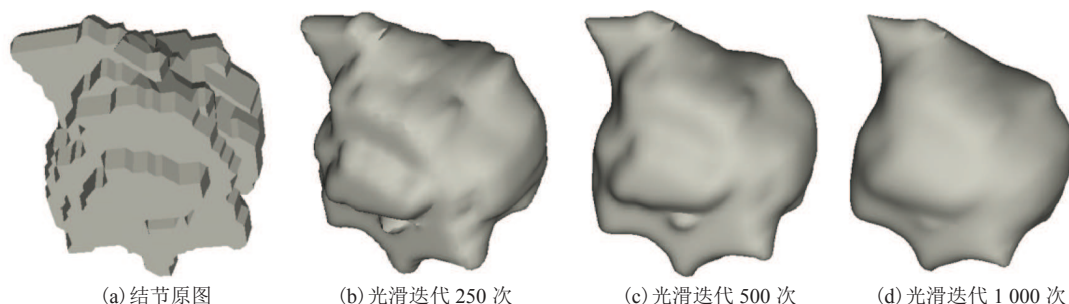


图 11 光滑处理效果图

Fig. 11 Laplace smoothing effect map



图 12 Garland 的 QWM 算法在简化过程中会导致过简化失真效果^[9]

Fig. 12 Garland's simplify will lead to a excess simplification and distortion effect^[9]



图 13 Garland 的 QWM 算法在简化过程中会导致过简化失真效果^[10]

Fig. 13 Garland's simplify will lead to a excess simplification and distortion effect^[10]

鉴于此，我们提出简化忍受因子 β 的概念，让模型的简化在一个可以控制的范围内，可以防止过度简化带来的模型失真问题，成功地将模型保证在一个比较高的质量下，达到简化的最佳状态，有更好的渲染效果。这种方法简化后的模型发布到 HoloLens 上，不仅不会出现模型不完整、模型位置不正确和模型抖动的现象，而且简化前后的模型视觉效果相似度非常高。

5 结论

这种通过贪心算法和拉普拉斯平滑处理对模型的处理方法，可以在降低模型数据量时尽可能地减少模型的失真。它在增强/虚拟现实、游戏人物模型简化和设计等领域有着广泛的应用，可以在保证模型质量的情况下将模型精简到更好的水平。

参考文献

[1] 胡智标. 增强教学效果拓展学习空间——增强现实技术在教育中的应用研究 [J]. 远程教育杂志, 2014, 32(2): 106-112.
[2] 聂长海, 徐宝文. 一种最小测试用例集生成方法 [J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1690-1695.

[3] Dubuisson MP, Jain AK. A modified Hausdorff distance for object matching [C] // Proceedings of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition, 1994: 566-568.
[4] Hua Z, Huang Z, Li J. Mesh simplification using vertex clustering based on principal curvature [J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2015, 10(9): 99-110.
[5] Fischer A, Riesen K, Bunke H. Improved quadratic time approximation of graph edit distance by combining Hausdorff matching and greedy assignment [J]. Pattern Recognition Letters, 2017, 87(1): 55-62.
[6] 王卉, 黄玉清. 基于拉普拉斯算子的三角网格模型的平滑与压缩算法 [J]. 计算机系统应用, 2015, 24(12): 191-195.
[7] Schroeder WJ, Zarge JA, Lorensen WE. Decimation of triangle meshes [J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1992, 26(2): 65-70.
[8] Wu K, Otoo EJ, Shoshani A. Optimizing bitmap indices with efficient compression [J]. ACM Transactions on Database Systems, 2006, 31(1): 1-38.
[9] Wang W, Zhou M, Shui W, et al. An improved quadric error metrics algorithm based on triangle strips [C] // 2016 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), 2016: 149-151.
[10] 吴婧文, 全吉成, 赵秀影, 等. 改进加权 QEM 算法与层次细节技术实现 [J]. 计算机与信息技术, 2012, 1(3): 28-31.
[11] 侯宝明, 刘雪娜, 鄂旭. 基于 QEM 以方差作为权值的 3D 网格模型简化 [J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(11): 50-53.
[12] 乔建成. 基于特征保持的网格简化算法研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.