

12-13-2019

A Mesh Model Simplification Method Based on Visual Feature Preservation

Che Li

1. Army Aviation Institute, Beijing 100123, China; ;2. Marine College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

Dejun Tang

1. Army Aviation Institute, Beijing 100123, China; ;

Shimin Li

1. Army Aviation Institute, Beijing 100123, China; ;

Fengju Kang

2. Marine College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

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.

A Mesh Model Simplification Method Based on Visual Feature Preservation

Abstract

Abstract: Aiming at the problems of mesh visual feature loss and oversimplification in mesh simplification algorithm, a visual feature preservation based triangle mesh model simplification algorithm is proposed. *The multi-viewpoint perception method is used to measure the visual perception error caused by the difference between the original and the simplified model in the two-dimensional view under the optimal viewpoint set. Based on QEM algorithm, a novel geometric error metric is built by introducing the triangle shape factor. The triangle collapse error function is defined by combining visual perception and geometric error to control the simplified depth of the model. Through new vertex position optimization and error update, the mesh model simplification of visual feature preservation is achieved.* The experimental results show that the proposed algorithm outperforms the traditional method in simplifying visual quality and geometric quality, and can better maintain the visual and geometric feature information of the model.

Keywords

mesh simplification, multi-viewpoint error, quadric error metric, visual features

Recommended Citation

Che Li, Tang Dejun, Li Shimin, Kang Fengju. A Mesh Model Simplification Method Based on Visual Feature Preservation[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2247-2254.

一种视觉特征保持的网格模型简化方法

车力^{1,2}, 唐德军¹, 李世民¹, 康凤举²

(1. 陆军航空兵学院, 北京 100123; 2. 西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 针对网格简化算法存在模型视觉特征丢失、过简化等问题, 提出了一种视觉特征保持的三角形折叠网格模型简化算法。采用多视点感知方法对原始模型与简化模型在最优视点集下的二维视图差异作为简化引起的视觉感知降质。在二次误差度量(Quadric Error Metric, QEM)基础上引入三角形特征因子构建了几何特征误差度量函数。结合视觉感知和几何误差定义三角形折叠误差度量函数以控制模型的简化深度。通过优化新顶点位置与误差更新实现了视觉特征保持的网格模型简化。实验结果表明提出算法在简化视觉质量和几何质量方面优于传统的方法, 能够较好的保持模型的视觉、几何特征信息。

关键词: 网格简化; 多视点误差; 二次误差度量; 视觉特征

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2019)11-2247-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0295

A Mesh Model Simplification Method Based on Visual Feature Preservation

Che Li^{1,2}, Tang Dejun¹, Li Shimin¹, Kang Fengju²

(1. Army Aviation Institute, Beijing 100123, China; 2. Marine College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at the problems of mesh visual feature loss and oversimplification in mesh simplification algorithm, a visual feature preservation based triangle mesh model simplification algorithm is proposed. The multi-viewpoint perception method is used to measure the visual perception error caused by the difference between the original and the simplified model in the two-dimensional view under the optimal viewpoint set. Based on QEM algorithm, a novel geometric error metric is built by introducing the triangle shape factor. The triangle collapse error function is defined by combining visual perception and geometric error to control the simplified depth of the model. Through new vertex position optimization and error update, the mesh model simplification of visual feature preservation is achieved. The experimental results show that the proposed algorithm outperforms the traditional method in simplifying visual quality and geometric quality, and can better maintain the visual and geometric feature information of the model.

Keywords: mesh simplification; multi-viewpoint error; quadric error metric; visual features

引言

随着三维建模、三维扫描数据捕获以及基于图



收稿日期: 2019-05-16 修回日期: 2019-07-08;
作者简介: 车力(1986-), 男, 陕西渭南, 博士, 工程师, 研究方向为计算机建模、仿真与可视化; 唐德军(1975-), 男, 山东济南, 工程师, 研究方向为装备指挥管理与仿真; 李世民(1986-), 男, 山西临汾, 学士, 工程师, 研究方向为装备论证评估。

像重构等技术的发展, 由三角形网格组成的三维模型建模复杂度、表示精细度越来越高。受限于内存容量、总线带宽和 CPU 处理性能, 存储和绘制这类网格模型具有很大挑战。视觉感知实验表明, 受人类视觉系统(Human Visual System, HVS)分辨率的影响额外的几何细节对于 HVS 是不可感知的^[1]。网格模型简化以视觉或几何度量为准则, 通过顶点

聚类、边/三角形折叠剔除 HVS 不可感知的视觉冗余细节降低模型的复杂性, 达到解决复杂度与计算机能力之间的矛盾, 实现渲染性能的提升。

目前国内外学者提出的网格模型简化算法按照简化驱动机制可分为 5 类: 图元聚类/区域合并驱动、几何驱动、视点质量驱动、视觉感知驱动以及语义信息驱动。图元聚类/合并驱动^[2-4]简化算法采用顶点聚类或是区域合并的图元操作方法。该类算法具有编程实现简单, 健壮性好, 无拓扑结构限制, 适于并行处理, 简化效率高的优点。缺点是简化精度与包围盒的划分尺度有关。无法保持拓扑结构, 存在过简化, 不适合简化几何复杂性高的模型。几何驱动^[5-7]简化算法采用边折叠或是三角形折叠的图元操作方法。该类算法较好保持几何属性及网格拓扑结构, 具有算法执行效率较高的优点。缺点是模型中的不可见部分不能进行显著地简化, 如模型内部结构。视点质量驱动^[8-9]简化算法采用边折叠或是三角形折叠的图元操作方法。该类算法较好保持模型轮廓等视觉信息, 能够显著简化场景网格中的不可见部分, 简化模型的认知度高。缺点是需多次渲染模型获得图像差异, 算法计算复杂度高。简化质量依赖于视点的个数、分布和视图的分辨率。视觉感知驱动^[10-12]简化算法采用边折叠或是三角形折叠的图元操作方法。该类算法显著简化模型不被人眼感知的细节, 较好的保持模型的边缘轮廓信息, 简化结果符合人眼感知特性。缺点是感知模型无法确定可感知部位的最佳简化率, 不适用复杂模型的简化且简化质量易受其二维视图分辨率影响。语义信息驱动^[13-14]简化算法采用顶点聚类、区域合并、边折叠和三角形折叠的图元操作方法。该类算法简化操作基于模型语义信息, 结果主观一致性高。模型重要视觉特征能够很好的保留。然而简化需人工干预, 且受限于模型语义理解和提取水平, 简化差异较大, 难以得到广泛应用。针对上述文献存在模型视觉特征丢失、过简化等问题, 提出了一种基于视觉感知与二次误差度量融合的网格模型简化算法。首先, 采用多视点感知方法对原始

模型与简化模型在最优视点集下的二维视图差异作为模型简化引起的视觉感知误差。其次, 在 QEM 算法基础上引入三角形特征因子构建了几何特征误差度量函数。将视觉感知误差和几何特征误差结合定义三角形折叠误差。最后, 通过优化新顶点位置与误差更新实现了视觉特征保持的网格模型简化。

1 相关工作

1.1 基本定义

三角网格 TM (Triangle Mesh) 中包含网格顶点 V 和三角形面 T 等基本信息。

定义 1: 三角形网格 TM 中, 对于任意三角形 t_i 的某一边为边界边时, 则定义三角形 t_i 为边界三角形, 否则为内部三角形。

定义 2: 三角形网格 TM 中, 对于与任意一顶点 v_i 相邻的所有的三角形 t 构成的集合, 定义为顶点 v_i 相关的三角形集合。

定义 3: 三角形网格 TM 中, 对于与三角形 t_i 的 3 个顶点相关的三角形构成的集合, 定义为三角形 t_i 的邻接三角形集合。

1.2 二次误差测度

三维欧氏空间中网格中的三角形定义一个平面, 设平面方程为 $ax+by+cz+d=0$, $a^2+b^2+c^2=1$, d 为任意常数。根据平面方程系数将平面记为 $P=[a, b, c, d]^T$ 。网格上一新顶点 v , 坐标记为 $[v_x, v_y, v_z, 1]^T$, $P(v)$ 为顶点 v 的邻域三角集, p 为 $P(v)$ 中的一个三角网格记为 $p \in P(v)$ 。新顶点 v 到邻域三角形集合 $P(v)$ 中各三角网格距离的平方和定义为:

$$D_p^2(v) = \sum_{p \in P(v)} d_p^2(v) = v^T \left(\sum_{p \in P(v)} K_p \right) v$$

式中: $v^T=[v_x, v_y, v_z, 1]$, K_p 为四阶对称矩阵。定义新顶点 v 的二次误差矩阵为:

$$Q(v) = \sum_{p \in P(v)} K_p \quad (1)$$

边 $v_i v_j$ 完成边折叠操作后折叠到新的顶点 v 时, 边折叠代价数学计算公式为:

$$\Delta(v) = v^T Q(v) v = v^T (Q(v_i) + Q(v_j)) v \quad (2)$$

新顶点 v 的位置通过对边折叠代价公式 $\Delta(v)$ 求偏导获得如果式(2)不可逆, 则从 v_i, v_j 或 $(v_i+v_j)/2$ 中选择使折叠代价最小的点为新顶点。

2 算法描述

提出的三角形折叠简化算法框架如图 1 所示。算法中三角形折叠引起的视觉误差以及几何误差

度量是简化的核心, 影响着三角形折叠顺序和模型简化质量的优劣。简化视觉感知度量由基于视觉感知的图像质量评价指标对三角形折叠后简化模型与原始模与在最优视点集下的二维视图差异计算获得。在几何误差度量方面, 引入三角形特征因子对标准 QEM 算法进行改进, 提高简化误差计算的准确性和网格特征的保持。通过将视觉误差与几何误差融合得到总的折叠误差进而指导简化进程。

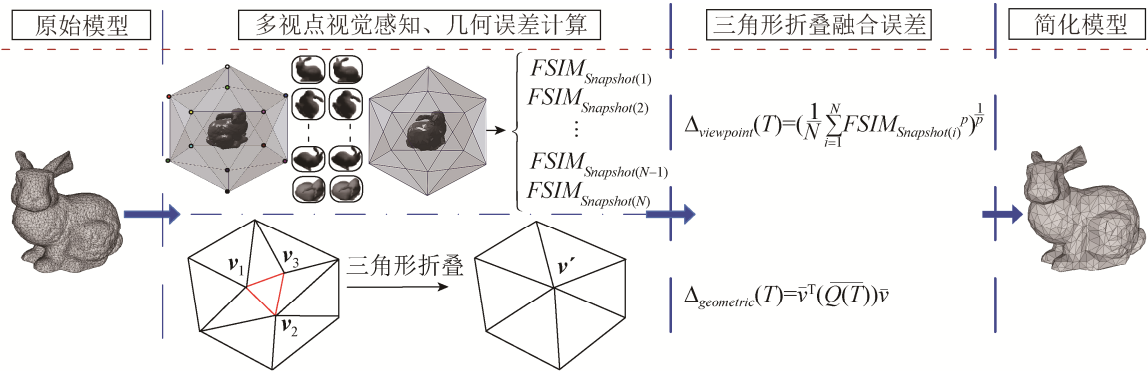


图 1 视觉感知与 QEM 融合的三角形折叠简化框架

Fig. 1 Triangular collapse simplification framework based on visual perception and QEM Fusion

3 简化视觉、几何融合误差度量方法

3.1 多视点感知误差度量提出

采用多视点图像进行简化视觉感知测度时视点的数目与分布影响最终视点质量误差的计算, 同时也影响着简化结果以及算法计算效率。文献[15]提出了一种多视点的模型简化视觉降质评价框架, 通过将客观评价结果与国际上通用的 The IEETA Simplification Database 数据库中的 MOS 进行相关性分析得到各评价因素最佳参数。为此, 在视点数目与分布采用模型最优视点集视点分布方法, 以兼顾计算效率和评价质量。视点质量误差计算采用图像质量评价指标特征相似度 (Feature Similarity, FSIM), 最优视点集对应视点误差采用闵可夫斯基池化计算总的三角形折叠视点质量误差。

假设原始网格在视点 Vp_i 获取的图像为 M_{image} , 同视点下简化网格图像为 M'_{image} , 定义三角形 T 折叠视点质量误差定义为:

$$\Delta_{\text{viewpoint}}(T) = 1 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Vp_i)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (3)$$

$$Vp_i = \text{FSIM}(M_{\text{image}}, M'_{\text{image}}) \quad (4)$$

式中: Vp_i 为第 i 个视点图像质量; N 为视点数目, 取值由模型最优视点数目确定; P 为闵可夫斯基指数设置为 2。

3.2 三角形特征约束的 QEM 几何误差度量

3.2.1 三角形特征因子

(1) 三角形狭长度:

文献[16]定义三角形狭长度 (Long and Narrow Degree, $L-N$) 作为三角形品质的度量标志, 设三角形最小内角为 $\min(\alpha)$, 根据三角形内角之和可知最小内角的范围是 $0 < \min(\alpha) \leq \pi/3$, 通过标准化变为 $0 < 2 \cdot (1 - \cos(\min(\alpha))) \leq 1$ 三角形狭长度定义为:

$$L-N(T) = 1 - \cos(\min(\alpha)) \quad (5)$$

(2) 三角形局部区域尖锐度:

网格模型特征显著区域三角形分布具有分布

密集、区域面积小和曲面弯曲程度大的特点。文献[17]提出三角形局部区域尖锐度(Local Region Sharpness, LR-S)衡量特征区域的平坦尖锐特征。设与三角形 T_0 相邻的三角形为 $T_1, T_2 \dots T_k$, 法向量为 $n_1, n_2 \dots n_k$, 则 LR-S(T)定义为:

$$LR-S(T) = \frac{\sum_{i=1}^k (1 - n \cdot n_i)}{k} \quad (6)$$

(3) 三角形局部区域面积:

实验证明局部区域面积在控制模型简化误差方面优于其他几何误差度量方法, 通过三角形局部区域面积(Local Region Area, LR-A)反映网格简化时三角形折叠对邻域三角形的整体影响。设与三角形 T_0 相邻的三角形为 $T_1, T_2 \dots T_k$, 对应的三角形面积分别为 $S_1, S_2 \dots S_k$, 则 LR-A(T)定义为:

$$LR-A(T) = \frac{\sum_{i=1}^k S_i}{k} \quad (7)$$

式中: $S = \sqrt{a(a-l_1)(a-l_2)(a-l_3)}$, l 为三角形各边的长度, a 为三边长度和的一半。

3.2.2 改进的 QEM 算法

QEM 算法具有很好的累加性, 因此计算三角形折叠误差矩阵通过折叠三角形 3 个顶点的误差矩阵叠加获得。定义三角形的误差矩阵为:

$$Q(T) = \sum_{v \in T} Q(v) = Q(v_1) + Q(v_2) + Q(v_3) \quad (8)$$

将三角形特征因子作为网格特征约束因子, 定义三角形折叠新的误差矩阵为:

$$\overline{Q(T)} = \frac{L-N(T) \times LR-S(T)}{LR-A(T)} Q(T) = \frac{L-N(T) \times LR-S(T)}{LR-A(T)} (Q(v_1) + Q(v_2) + Q(v_3)) \quad (9)$$

设三角形折叠到新顶点坐标为 \bar{v} , 则该三角形折叠产生的误差定义为:

$$\Delta_{\text{geometric}}(T) = \bar{v}^T \overline{Q(T)} \bar{v} \quad (10)$$

3.3 新顶点位置优化

三角形折叠误差由几何误差即三角形二次误

差和视点质量误差线性叠加组成, 表达式如下:

$$\Delta(T) = \alpha \cdot \Delta_{\text{geometric}}(T) + \beta \cdot \Delta_{\text{viewpoint}}(T) = \alpha \cdot \bar{v}^T \overline{Q(T)} \bar{v} + \beta \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Vp_i)^p\right)^{\frac{1}{p}}\right) \quad (11)$$

式中: α, β 为几何误差和视点质量误差权重因子。

对于边界三角形折叠新顶点 \bar{v} 位置采用边界边顶点 v_i, v_j 加权平均获得:

$$\bar{v} = w \cdot v_i + (1-w) \cdot v_j \quad (12)$$

式中: w 为顶点权重, 由 $\partial \Delta_{\text{geometric}}(T) / \partial w = 0$ 获得。

对于内部三角形折叠新顶点位置计算与标准 QEM 算法相似, 新顶点的坐标值通过式(11)求偏导获得, 若式不可逆则采用文献[18]提出方法计算新顶点位置。

$$\frac{\partial \Delta_{\text{geometric}}(T)}{\partial x} = \frac{\partial \Delta_{\text{geometric}}(T)}{\partial y} = \frac{\partial \Delta_{\text{geometric}}(T)}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

4 实验结果与分析

基于 VS 2010 编程环境采用 C++ 对算法实现, 硬件环境为 i7 3.4GHz, 4GB 内存、NVIDIA GeForce GTX 260 显卡, 采用计算机图形学领域 3 种常见模型 Bunny, Armadillo, Dragon 为例进行算法实现与性能分析。采用文献[19]方法计算最优视点集, 3 种模型最优视点集中视点数目分别为 4, 5, 5。为了验证提出算法的性能, 将所提算法与 Qslim^[3]和视点互信息 VMI^[8]两种网格模型简化算法进行比较分析。实验中权重因子 α 和 β 都设为 1。

图 2 为 Bunny 模型采用 Qslim 算法、VMI 算法和本文算法简化结果。图 2(a)~(c)为模型三角形数目简化 60% 时 3 种简化算法简化结果, 由简化结果可知在低简化率时 3 种简化算法的简化结果在视觉效果上无明显的差异。图 2(d)~(f)为模型三角形数目简化 95% 时 3 种简化算法简化结果, 简化结果可以看出在模型的耳朵、面部以及脚部这些特征部位, 本文算法能保留更多的三角形进行特征的描述, 且特征边界保持以及不规则三角性数量上本文算法同样优于 Qslim 和 VMI 算法。

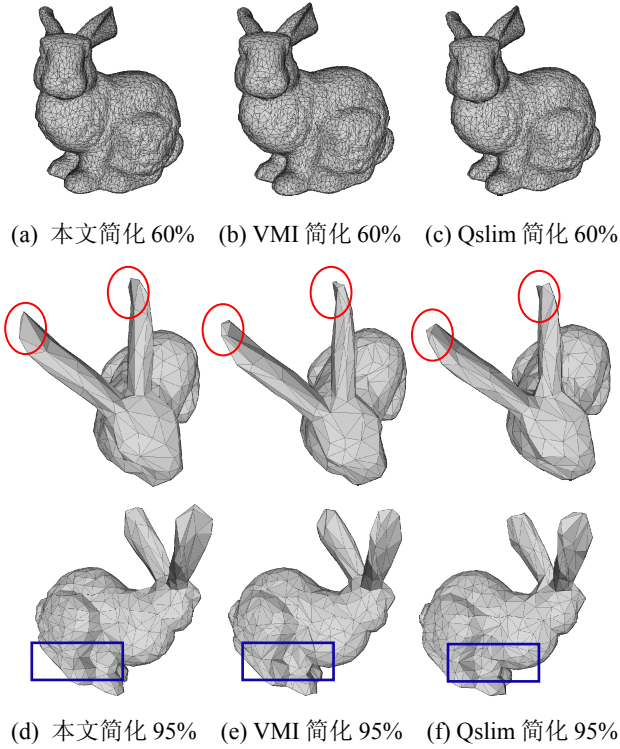


图 2 Bunny 模型 3 种简化方法简化质量对比
Fig. 2 Simplification quality comparison using three simplified methods of Bunny model

图 3 为 Armadillo 模型分别采用 Qslim 算法、VMI 算法和本文算法简化结果。由图 3(a)~(c)所示在简化率为 90%时在简化视觉效果上无明显差异。随着简化率提高为 96%时, 如图 3(d)~(f)所示, 本文算法简化结果中对 Armadillo 模型爪子、嘴等部位特征的保持优于 VMI 和 Qslim 算法。

图 4 给出了 Dragon 模型分别采用 Qslim 算法、VMI 算法和本文算法在简化率 90%、96%下简化结果。由于 Dragon 模型顶点数目较大, 在简化率为 90%时图 4(a)~(c)所示, 3 种简化算法获得的简化模型在视觉感知效果上差异甚小。随着简化比率的提升当简化率为 96%时, 如图 4(d)~(f)所示, 本文算法在保持模型尾部、背部锯齿、等特征保持优于 VMI 和 Qslim 算法。

为了定量分析 Qslim 算法、VMI 算法和本文算法简化质量的优劣性, 对 3 种模型分别从简化模型几何误差和视觉误差两方面对算法进行比较分析。几何误差度量采用简化网格与原始网格间的

Hausdorff 距离误差来进行比较。视觉误差度量采用多视点图像评价方法, 图像质量评价指标为 IW-SSIM, 采用 32 个视点, 误差 Pooling 采用 P-2, 采用顶部位置光源进行三维模型的渲染, 渲染图像的分辨率为 1 200×900。

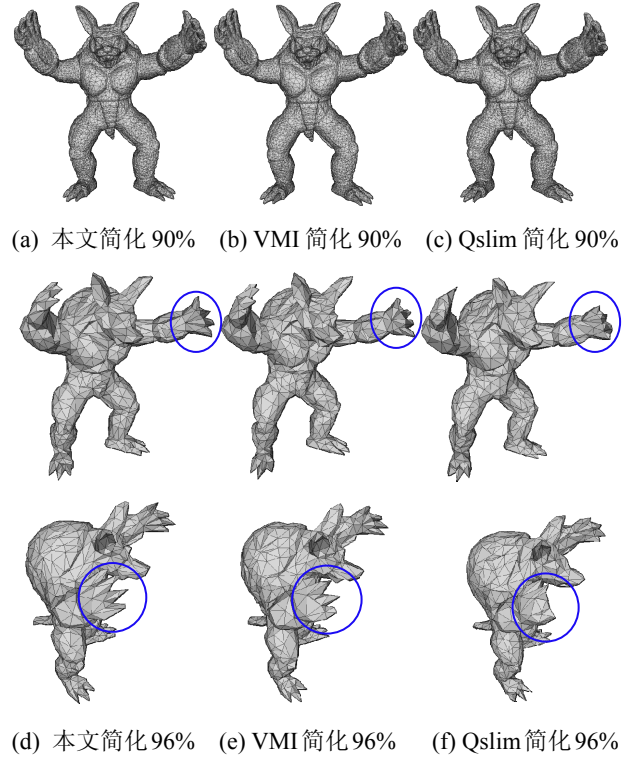


图 3 Armadillo 模型 3 种简化方法简化质量对比
Fig. 3 Simplification quality comparison using three simplified methods of Armadillo model

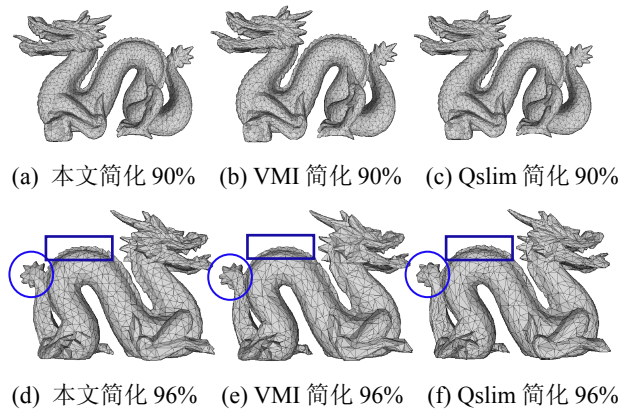


图 4 Dragon 模型 3 种简化方法简化质量对比
Fig. 4 Simplification quality comparison using three simplified methods of Dragon model

图 5 给出了 Qslim 算法、VMI 算法和本文算法简化几何误差、视觉相似度比较结果。在相同的模型简化率下，对于 Bunny 模型本文算法获得的简化模型相对于原始模型所产生的几何误差比 Qslim 算法降低了 8%~48%，比 VMI 降低了 7%~25%。在视觉相似度方面较 Qslim 算法提高了 3%~16%，比 VMI 提高了 2%~5%。对于 Armadillo 模型本文算法获得的简化模型相对于原始模型所产生的几何误差比 Qslim 算法降低了 30%~60%，比 VMI 降低了 15%~41%。在视觉相似度方面较 Qslim 算法

提高了 4%~19%，比 VMI 提高了 3%~8%。对于 Dragon 模型本文算法获得的简化模型相对于原始模型所产生的几何误差比 Qslim 算法降低了 39%~66%，比 VMI 降低了 22%~39%。在视觉相似度方面较 Qslim 算法提高了 9%~26%，比 VMI 提高了 3%~8%。由 3 种模型的简化几何误差曲线和图像质量曲线可以看出本文算法优于基于几何误差简化算法 Qslim 和基于视点质量简化方法 VMI，同时 VMI 算法优于 Qslim 算法。

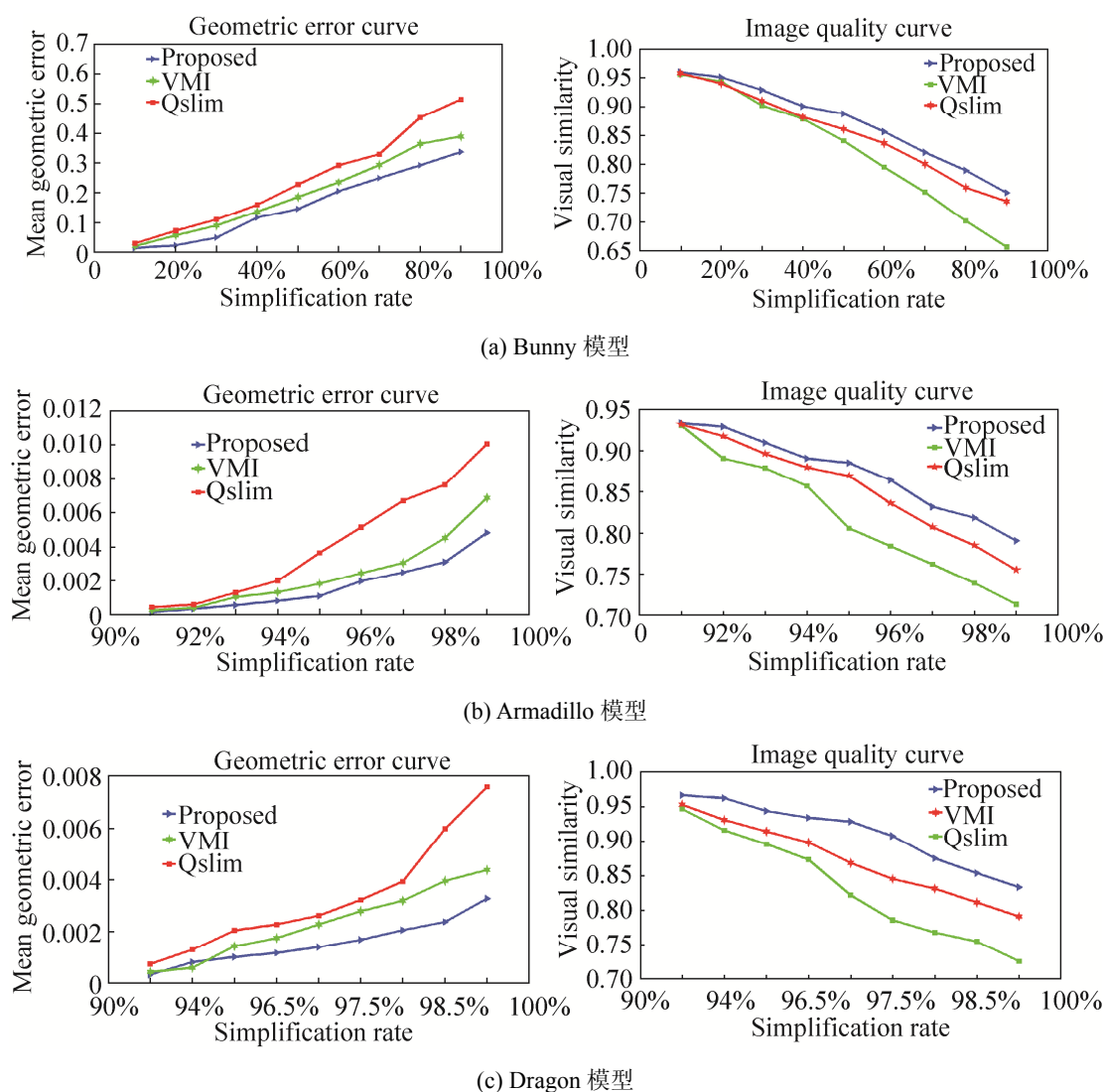


图 5 Qslim、VMI 和本文算法模型简化质量对比

Fig. 5 Model simplification quality comparison of Qslim, VMI and the proposed algorithm

5 结论

本文提出了一种结合视觉感知与二次误差度量的网格模型简化算法, 解决网格简化算法存在模型视觉特征丢失、过简化等问题。算法通过计算三角形折叠引起的视觉感知误差和几何误差确定三角形面片折叠顺序。视觉感知误差采用原始模型与简化模型在最优视点集下的图像误差计算。通过在标准二次误差基础上加入三角形形态约束因子计算几何误差, 能够准确计算三角形折叠引起的误差, 同时有效避免折叠后不规则三角形的出现, 较好的保持模型的细节特征。对比试验结果表明所提算法在简化几何误差和视觉相似度方面优于传统的几何驱动与视点质量驱动的简化算法。

算法在执行中需要多次视点渲染计算折叠后不同视点误差耗时较长, 采用 GPU 加速提高计算效率是下一步工作的重点。同时, 在本文算法的基础上, 将简化误差扩展至颜色误差、纹理误差等多维误差向量, 实现对具有纹理模型的简化。

参考文献:

- [1] Kundu D, Evans B L. Full-reference visual quality assessment for synthetic images: A subjective study[C]. IEEE International Conference on Image Processing. Arizona, USA, IEEE, 2016: 2374-2378
- [2] Chen J, Li M, Li J. An improved texture-related vertex clustering algorithm for model simplification[J]. Computers & Geosciences (S0098-3004), 2015, 83(3): 37-45.
- [3] Garland M, Heckbert P S. Surface simplification using quadric error metrics[C]. Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques. Singapore: ACM Press, 1997, 31: 209-216.
- [4] Hua Z, Huang Z L. Mesh Simplification Using Vertex Clustering Based on Principal Curvature[J]. International Journal of Multimedia & Ubiquitous Engineering (S0376-7388), 2015, 9(10): 99-110.
- [5] Li Y, Shihui H, Hui X. Quadratic Error Metric Mesh Simplification Algorithm Based on Discrete Curvature[J]. Mathematical Problems in Engineering (S1024-123X), 2015, 2015: 1-7.
- [6] 段黎明, 邵辉, 李中明, 等. 高效率的三角网格模型保特征简化方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 460-468.
- [7] Duan Liming, Shao Hui, Li Zhongming, et al. Simplification method for feature preserving of efficient triangular mesh model[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(2): 460-468.
- [8] Jia Q, Liu Y S, Gu X Y. Edge Collapse Mesh Simplification Algorithm Based on Detail Features Preserving[J]. Journal of Computational Information Systems (S1553-9105), 2014, 10(7): 2883-2890.
- [9] Castelló P, Sbert M, Chover M. Viewpoint-Driven Simplification Using Mutual Information[J]. Computers & Graphics (S0097-8493), 2008, 32(4): 451-463.
- [10] Yang B, Li F W B, Wang X, et al. Visual saliency guided textured model simplification[J]. The Visual Computer (S0178-2789), 2016, 32(11): 1415-1432.
- [11] 王爱霖, 刘弘, 张桂娟. 基于谷脊线特征的三维网格模型简化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(5): 788-793.
- [12] Wang Ailin, Liu Hong, Zhang Guijuan. A Mesh simplification Method Based on Ridge-valley Lines[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(5): 788-793.
- [13] Miao Y W, Hu F X, Chen M Y, et al. Visual saliency guided feature-aware shape simplification[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering (S2095-9184), 2014, 15(9): 744-753.
- [14] Yang B, Li F W B, Wang X. Visual saliency guided textured model simplification[J]. Visual Computer International Journal of Computer Graphics(S0178-2789), 2016, 32(11): 1415-1432.
- [15] Yang J, Jeong K, Oh K. User Interaction-Based Mesh Simplification for Preserving Geometric Shapes[C]. International Conference on Computer Science, Data Mining & Mechanical Engg. London: ACM Press, 2015: 143-148.
- [16] Verdie Y, Lafarge F, Alliez P. LOD Generation for Urban Scenes[J]. Acm Transactions on Graphics(S0730-0301), 2015, 34(3): 1-14.
- [17] Che L, Kang F J. Exploring the Efficiency of Image Metric for Assessing the Visual Quality of 3D Mesh Model[J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing(S1793-9623), 2018, 9(6): 1850056.1-24.
- [18] 胡于进, 蔡建荣, 凌玲, 等. 基于物理属性与三角形正则度的网格简化算法[J]. 华中科技大学学报, 2011(6): 96-100.

- Hu Yujin, Cai Jianrong, Ling Ling, et al. Simplified algorithm of mesh by using physical properties and tringler regularity[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech., 2011(6): 96-100.
- [17] 张欣, 秦茂玲, 谢堂龙. 基于特征保持的三角形折叠网格简化算法[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(1): 94-97.
- Zhang Xin, Qin Maoling, Xie Tanglong. Mesh Simplification Algorithm of Triangle Collapse Based on Feature Preserving[J]. Computer Technology and Development, 2012, 22(1): 94-97.
- [18] 周元峰, 张彩明, 贺平. 体积平方度量下的特征保持网格简化方法[J]. 计算机学报, 2009, 32(2): 203-212.
- Zhou Yuanfeng, Zhang Caiming, He Ping. Feature Preserving Mesh Simplification Algorithm Based on Square Volume Measure[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(2): 203-212.
- [19] 韩红雷, 李静, 费广正. 结合视觉感知与信息量的视点评分方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(6): 939-947.
- Han Honglei, Li Jing, Fei Guangzheng. A Hybrid Measure of Viewpoint Scoring Using Visual Perception and Information Entropy[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(6): 939-947.