

多特征融合的网络模型简化方法

王海玲^{1,2*}, 王建³, 印桂生², 乔付¹, 周波¹

(1. 黑龙江科技大学 计算机与信息工程学院, 哈尔滨 150027; 2. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001;

3. 哈尔滨工程大学 网络信息中心, 哈尔滨 150001)

(* 通信作者电子邮箱 whl020519@163.com)

摘要:针对三维网格模型简化过程中的过简化和失真问题,提出一种利用多特征融合的度量方法引导三维网格模型的简化过程。该方法通过分析模型简化的误差度量准则和模型的特征信息,首先利用法向信息加权的二次误差方法度量模型的几何特征信息;然后采用三角形边长比信息加权的挠率度量模型的视觉特征信息;最后融合几何特征信息和视觉特征信息作为模型简化的多特征信息引导模型简化。实验结果表明,该方法可有效保证算法的计算效率,保持简化后模型的形态特征,解决了模型的过简化和失真问题。

关键词:模型简化;误差度量;特征分析;多特征融合

中图分类号: TP391.412 **文献标志码:** A

Multi-feature fusion method for mesh simplification

WANG Hailing^{1,2*}, WANG Jian³, YIN Guisheng², QIAO Fu¹, ZHOU Bo¹

(1. College of Computer and Information Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang 150027, China;

2. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China;

3. Centre of Network Information, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Most mesh simplification algorithms for three-dimensional (3D) may cause oversimplification and distortion in the processing of simplification. To address this problem, an efficient multi-feature fusion method for mesh simplification was proposed. The proposed method measured geometric feature information based on quadric error metric weighted by normal information firstly, then used torsion weighted by side ratio of triangle to measure visual feature information, at last proposed a multi-feature fusion metric to guide model simplification. The experimental results have been compared on execution time and visual quality with other edge contraction algorithms; the results show that the proposed method can guarantee computational efficiency, improve visual shape feature, and reduce oversimplification and distortion for simplified model.

Key words: mesh simplification; error metric; feature analysis; multi-feature fusion

0 引言

三维网格模型是计算机图形学和虚拟现实领域模型的通用描述方式,然而随着人们对虚拟场景真实感需求的提高,模型的规模和复杂度逐渐提升,从而增加了计算机的存储和处理负担。因此,如何在保证模型真实感的前提下减少模型的网格基元数量成为了一个热点问题。

模型简化算法是依据一定规则来减少基元数量,可以将数以万计的网格数量减少到几千、几百甚至几十个单元,是解决模型规模和复杂度问题的有效途径之一。根据不同的分类标准,模型简化算法可以分为不同类型,但无论哪种模型简化算法,都可归属为顶点简化^[1]、边简化^[2-3]或面简化^[4]的模型简化类型。模型简化算法的目标是在降低网格基元数量的同时保持与原模型近似的几何特征和视觉特征,其关键是基元度量和新顶点生成,其中,基元重要度度量的准确性和合理性是模型简化算法的核心因素,决定模型简化的效率和质量^[5-6],目前,基元重要度的度量法主要有距离法^[7]、面积法^[8-9]、体积法^[10-11]、法向量^[12]、曲率^[13]。由于以往的模型

简化算法多采用单一的基元重要度评估方法,使简化后的模型无法有效保持原模型的特征信息,因此,多特征融合的度量方法^[14]颇受关注。

Garland的基于二次误差的模型简化算法由于计算较简单、计算速度较快、模型简化质量较好和存储量少的特点至今仍被广泛应用于模型简化,但该算法只采用单一的二次误差度量(Quadric Error Metric, QEM)方法,忽视模型基元的其他特征信息(形状、纹理、法向、曲率),使简化模型中存在劣质基元;此外,QEM将前一次简化的顶点对的重要度度量值作为新顶点的重要度度量值,使误差的偏差持续累积,降低了重要度度量的准确性,造成简化失真现象。为了解决上述算法的过简化和失真问题,已提出多个算法^[14-18],但这些算法存储求解较复杂^[14-16]或特征保持不足^[17-18]。

本文在文献[7]的算法基础上引入形状特征信息和视觉特征信息度量模型基元的重要度,以提高简化模型的逼真度。最终对模型的简化效果、简化时间和简化误差进行对比实验,结果表明,多特征融合的模型简化算法在不增加算法运算时间的同时,可有效保留简化模型的特征信息。

收稿日期:2013-05-10;修回日期:2013-07-17。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60973075);黑龙江省自然科学基金资助项目(F200937)。

作者简介:王海玲(1980-),女,河北邯郸人,博士研究生,CCF会员,主要研究方向:虚拟现实、计算机图形学;王建(1980-),男,安徽砀山人,工程师,硕士,主要研究方向:并行计算、计算机网络;印桂生(1964-),男,江苏泰兴人,教授,博士生导师,博士,CCF会员,主要研究方向:数据库和知识库应用系统、虚拟现实。

1 二次误差度量方法

QEM是采用顶点到其邻接面距离的平方和作为重要度量方法。设模型顶点为 $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ v_z \ 1]^T$,其邻接平面为 $\mathbf{p} = [a \ b \ c \ d]^T$, $ax + by + cz + d = 0$, $a^2 + b^2 + c^2 = 1$,则二次误差度量QEM表示为:

$$\Delta(\mathbf{v}) = \sum_{\mathbf{p} \in \text{planes}(\mathbf{v})} (\mathbf{p}^T \mathbf{v})^2 = \mathbf{v}^T \left(\sum_{\mathbf{p} \in \text{planes}(\mathbf{v})} \mathbf{p} \mathbf{p}^T \right) \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{p} \mathbf{p}^T = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix}$$

其中 \mathbf{K}_p 为基本误差二次式。

对于边折叠 $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j) \rightarrow \bar{\mathbf{v}}$,新顶点 $\bar{\mathbf{v}}$ 的重要度量矩阵为 $\Delta(\bar{\mathbf{v}})$,且顶点 $\bar{\mathbf{v}}$ 的位置由极小化 $\Delta(\bar{\mathbf{v}})$ 获得,计算公式为:

$$\frac{\partial \Delta(\bar{\mathbf{v}})}{\partial x} = \frac{\partial \Delta(\bar{\mathbf{v}})}{\partial y} = \frac{\partial \Delta(\bar{\mathbf{v}})}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

2 多特征度量方法

实际环境中的模型包含几何、形状、颜色、纹理、视觉感知等多种特征信息,如果在不增加计算量和复杂的前提下关注模型的诸多特征信息,将会提高模型简化算法的效率和简化模型的质量。实际上模型简化算法的度量函数应包含几何特征度量和视觉特征^[19]。因此,本文的重要度量函数结合几何特征信息和视觉特征信息构造多特征度量函数,公式为:

$$Cost_{all} = C_{geom} + C_{visu} \quad (3)$$

其中: $Cost_{all}$ 为多特征度量函数, C_{geom} 的几何特征度量算子, C_{visu} 为视觉特征度量算子。

2.1 几何形状特征度量算子

文献[20]指出面积是模型的一个重要的特征信息,网格模型的高细节、多信息区域通常包含大量的三角形单元,而细节低、少信息的区域包含的三角形单元较少。

QEM是一个具有面积权重的度量方法,采用该方法的模型简化会优先简化面积较小的三角形,保留面积较大的三角形,保证了模型简化的合理性。但曲度变化较大、面积较小的三角形也体现了曲度特征信息,该三角形不应简化。因此在模型简化过程中需要对模型的局部曲度加以考虑。

文献[21]指出法向信息可以表示模型局部的弯曲程度和变化趋向。此外,顶点的法向信息一般作为顶点的属性常量保存在顶点的索引信息中。于是采用顶点 \mathbf{v} 及其1-环邻域顶点集的法向信息度量顶点 \mathbf{v} 的视觉属性信息可以在不增加计算复杂度的基础上增强对模型曲度特征的度量。

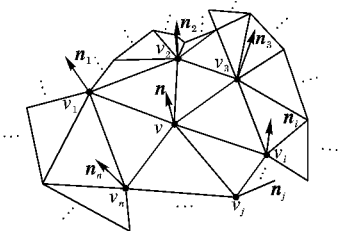


图1 邻域顶点法向

设 \mathbf{v} 的法向为 \mathbf{n} ,其1-环邻域顶点集的法向为 $\{\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k\}$ (如图1), \mathbf{v} 与邻域顶点的法向夹角 θ 的余弦函数表示为

$\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_1, \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_k$ (k 为自然数)。 $\cos \theta$ ($0 \leq \theta \leq \pi$)为单调递减函数,而模型简化中的度量值排序方式为从小到大,为了方便度量值计算的一致性, \mathbf{v} 的曲度特征度量方程写为:

$$C_{norm}(\mathbf{v}) = \left(\sum_{i=1}^k (1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_i) \right) / k \quad (4)$$

式(4)是一个单调递增函数,曲度较大或模型变化趋向较大的区域, C_{norm} 值较大,而平坦(曲度较小)区域, C_{norm} 值则较小,可见式(4)可以度量两个顶点法变化程度。因此,利用法向信息加权QEM作为模型的几何特征度量算子,模型顶点的几何特征度量算子为:

$$C_{geom}(\mathbf{v}) = C_{norm}(\mathbf{v}) \cdot \Delta(\mathbf{v})$$

2.2 视觉特征度量

模型简化过程中,保持模型的视觉特征信息也是十分必要的。文献[22-24]指出人类视觉敏感性较强的区域是物体的弯曲(边界、拐角、折痕)较大的区域,目前视觉特征信息通常采用离散曲率进行度量,但离散曲率的计算涉及与顶点相关的三角形面积、边相关平面的法向夹角和顶点处的角度,运算涉及平方、根号、除法、加法、减法等,运算复杂,计算量较大,影响模型简化速度。

在数学中,通常将曲率与挠率的关系表示为:

$$C_{curv}(x) = \varphi(x) T(x) \quad (5)$$

其中: x 变量, $C_{curv}(x)$ 为变量 x 曲率, $\varphi(x)$ 为变量 x 的函数, $T(x)$ 为变量 x 的挠率。

顶点的挠率方程表示为:

$$T(\mathbf{v}) = \frac{\sum_{\mathbf{v}_i \in \text{planes}(\mathbf{v})} \|\mathbf{B}_i - \mathbf{B}\|}{\sum_{\mathbf{v}_i \in \text{planes}(\mathbf{v})} \|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}\|} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{v} \sum_{\mathbf{v}_i \in \text{planes}(\mathbf{v})} \varepsilon_{\mathbf{v}} \mathbf{n}_i}{\left\| \sum_{\mathbf{v}_i \in \text{planes}(\mathbf{v})} \varepsilon_{\mathbf{v}} \mathbf{n}_i \right\|} \quad (7)$$

其中: $T(\mathbf{v})$ 为顶点 \mathbf{v} 的挠率, \mathbf{B} 为顶点 \mathbf{v} 的副法向, \mathbf{v} 为调节因子($\mathbf{v} = 0.6$), $\varepsilon_{\mathbf{v}}$ 通常为面积, $\text{planes}(\mathbf{v}) = \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k\}$ 为顶点 \mathbf{v} 的1-环邻域顶点集合, \mathbf{v}_i 为顶点 \mathbf{v} 的邻域顶点, $\mathbf{v}_i \in \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k\}$, \mathbf{n}_i 为顶点 \mathbf{v}_i 的法向量, \mathbf{B}_i 为顶点 \mathbf{v}_i 的副法向。

式(7)的挠率计算项只涉及顶点法向量和三角形面积,运算加、减、除,计算相对较简单,因此,本文采用挠率来近似度量模型的视觉特征。由于 $\varepsilon_{\mathbf{v}}$ 的计算相对比较耗时,为了减少计算量,采用文献[25]的计算方式估价模型顶点的副法向,式(7)表示为:

$$\mathbf{B} = \mathbf{v} \sum_{\mathbf{v}_i \in \text{planes}(\mathbf{v})} h_i \mathbf{n}_i \quad (8)$$

$$h_i = \begin{cases} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_i - \varepsilon)^2, & \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_i > \varepsilon \\ 0, & \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_i \leq \varepsilon \end{cases}$$

其中: h_i 为顶点 \mathbf{v}_i 的调整因子, ε 为阈值($\varepsilon = 0.4$)。

挠率表示基元的扭曲度,而在挠率值相同的情况下,三角形形状越差,则该基元的质量越差,需要优先考虑将其删除,因此,采用三角形形状因子加权挠率来近似多特征度量算子的视觉特征度量算子。

几何理论指出三角形形状可由其边或内角描述,理论认为等边长的三角形形状最好,边长之间的差异越大,三角形形状越差,即等角的三角形形状最好,内角差异越大,三角形形状越差(钝角三角形的最短边所对应的角度越小,三角形形

状越狭长,形状越差(如图2)。对于三角形网格模型,坐标作为顶点的常参数已知,由顶点坐标通过减少运算就可求得边长($l_i = \|v_1 - v_2\|$),而求解内角值则需要通过加、减、平方、除等数据运算求得($l_1^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2 \cdot l_3 \cos \theta_1$),计算量大且求解复杂,因此,选择三角形边长作为模型简化的形状因子。由于三角形面积也可通过边长求得($a' = \sqrt{s(s-l_1)(s-l_2)(s-l_3)}$, $s = \frac{1}{2}(l_1 + l_2 + l_3)$, a' 表示任一三角形面积),因此,利用边长描述三角形形状特征具有合理的理论和实验依据。三角形的形状因子评估方程为:

$$\zeta_{\text{leng}} = \begin{cases} \frac{l_i}{l_{i+1} + l_{i+2} + l_{i+3} + l_{i+4}}, & l_i \text{ 为内边} \\ \frac{l_i}{l_{i+1} + l_{i+2}}, & l_i \text{ 为边界边} \end{cases} \quad (9)$$

其中: l_i 为模型的内边; $l_{i+1}, l_{i+2}, l_{i+3}, l_{i+4}$ 为与 l_i 构成三角形的其他边。

综上所述,三角形形状因子加权挠率所构成的视觉特征度量算子的计算公式为:

$$C_{\text{visu}} = \zeta_{\text{leng}} \cdot T(v)$$

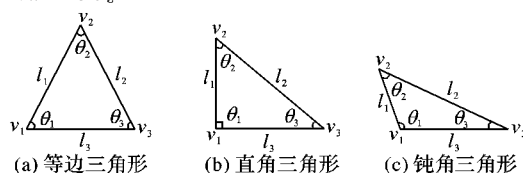


图2 三角形面积与边长关系

3 实验结果分析

3.1 合理性分析

物体模型不仅包含几何信息(大、小、长、短等),形状信息(规则性、平坦),还包含视觉信息(颜色、质地、明暗等)。多特征融合的模型简化算法联合几何特征(式(1))、视觉特征(式(4)和式(7))和三角形的形状特征(式(9))、度量模型基元(顶点、边或三角形)的重要性,不仅考虑单元间的距离信息,还关注三角形的形状特征和视觉信息,尽量简化形状较差、视觉敏感性较弱的三角形,并且这些因素的引入都具有实际经验和理论支撑,保证了算法的合理性。

3.2 复杂度分析

假设对图3模型M进行简化(17条边,9个顶点和9个三角形),形状特征度量方法利用边长比信息近似面积信息度量三角形的形状特征,在求解两个三角形边长比只需要计算4次减法、4次加法和1次除法运算,而求解三角形面积就需要11次减法、6次加法、6次乘法和1次开根号,因此,本文的几何形状度量算子(如式(9))计算量更少,计算速度更快。

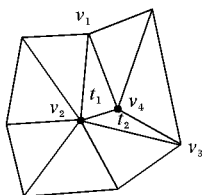


图3 三角形误差度量

视觉特征度量方法避开曲率计算中的复杂运算,而是利用计算较简化,与曲率和法向具有一定关系,并且表示模型扭曲度的挠率估价模型的视觉敏感度,其计算复杂度如表1。

表1 视觉特征度量计算复杂度统计

计算	运算次数				
	加法	减法	乘法	除法	根号
离散曲率度量	9 × 18	9 × 12	9 × 23	9 × 2	9 × 5
挠率度量	9 × 12	9 × 6	9 × 22	9 × 2	9 × 4

由表1中数据可知本文的形状约束挠率度量方法减少了54次加法、54次减法、9次乘法和9次根号的运算。

3.3 实验分析

为验证本文方法的简化质量和性能,以狗模型、牛模型、手模型和恐龙模型为实例进行算法分析。实验平台为酷睿E6400、4 GB内存和NVIDIA 9600GT显卡的PC机。表2所示为实验模型的初始信息(顶点数和面数),图4为模型的实体效果。

表2 实验模型数据统计

模型	顶点数量	三角形数量	模型	顶点数量	三角形数量
狗	1263	1331	手	130929	263595
牛	6211	12397	恐龙	389663	779275

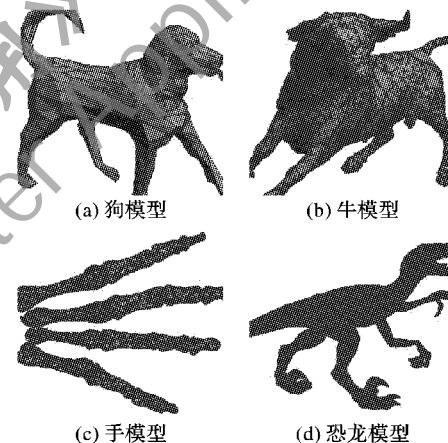


图4 实验模型

为了验证算法的性能,本文算法分别与离散曲率度量(Discrete Curvature Metric, DCM)算法、视觉特征保持(Visual Feature Preserve, VFP)算法以及QEM算法在简化质量、简化时间和简化误差进行实验对比。

图5是以狗模型为简化实例,分别采用模型简化算法DCM、VFP、QEM和本文算法进行模型简化的实验结果。该模型的初始三角形数量为1331个,简化后的三角形数量为913个,模型的简化率约为30%。由简化结果可以看出,与原模型相比,模型简化算法DCM的简化质量较差;模型简化算法QEM出现了裂缝,造成简化失真;模型简化算法VFP和本文方法的简化效果较好,保持了模型躯体前部和腿部的形状特征,使简化后的特征与原模型的特征更接近。实验表明,本文方法可有效保留简化模型的特征信息。

图6是以牛模型为简化实例,分别采用模型简化算法DCM、VFP、QEM和本文算法进行模型简化的实验结果。该模型的初始三角形数量为12397个,简化后的三角形数量为11409个,模型的简化率约为8%。由简化结果可以看出,对于具有大量基元的模型,如果模型的简化率较小,4种方法的简化质量均较好,保持了原模型的形状特征信息。然而本文方法有效控制了曲度较小(平坦)区域的简化深度。

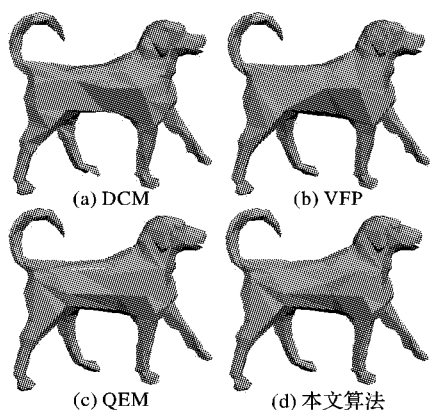


图5 狗模型的简化结果

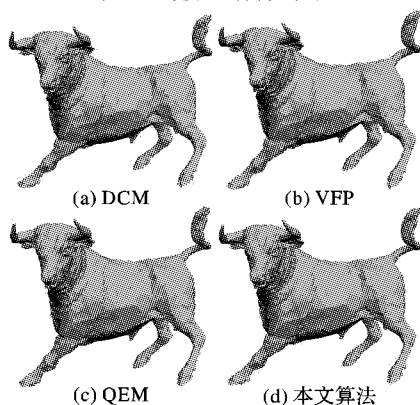


图6 牛模型的简化结果

表3是模型简化算法 QEM、VFP、DCM 和本文算法的简化时间统计,其中,第1列为简化对象,第2列为原模型的顶点和三角形数量,第3列为模型不同简化率的模型基元数量,第4列为4种模型简化算法在各个简化阶段所消耗的简化时间。由表中数据可以看出,本文算法的简化时间比其他3种简化算法的简化时间更短,简体速度更快。实验说明,本文方法在区域划分的基础上,利用区域基元密度控制子特征区域

的简化深度,有效减少了简化算法的计算量,提高了模型简化算法的计算速度。

由图5和表3中的实验数据可知,模型简化算法 DCM 的简化质量劣于算法 VFP、QEM 和本文方法,且算法 DCM 的简化时间最长,说明该算法的复杂最高,计算耗时,不适用于对模型简化速度要求较高的虚拟现实系统中。因此,本文的模型简化误差实验只针对简化速度相对较快的模型简化算法 VFP、QEM 和本文方法进行简化误差对比。

表3 模型简化算法运行时间统计

模型	简化前		简化后		简化时间/s			
	顶点数	面数	顶点数	面数	QEM	VFP	DCM	本文算法
狗	1263	1331	1109	1078	0.012	0.027	0.032	0.024
			1002	865	0.049	0.062	0.077	0.060
			596	411	0.112	0.117	0.124	0.114
			345	168	0.143	0.151	0.163	0.147
牛	621112397	12397	4083	8141	0.396	0.405	0.561	0.402
			2030	4635	0.577	0.612	0.733	0.594
			1071	2117	0.738	0.764	0.954	0.821
			386	747	0.887	0.924	1.371	0.985
手	130929	263595	49078	96894	17.269	19.526	22.032	19.331
			16623	31984	18.265	19.835	24.521	19.625
			6663	12089	18.265	20.224	25.173	19.878
			4873	8928	18.617	20.792	25.574	20.322
恐龙	389663	779275	179452	358853	30.741	35.358	58.535	49.899
			389663	71145	48.163	52.743	76.757	58.214
			1994	3837	52.178	68.866	93.016	73.233
			985	1919	52.425	69.373	93.437	73.654

图7是模型简化算法 VFP、QEM 和本文算法的简化误差对比,其中误差度量方法分别是 Metro 的最大几何误差和平均几何误差,模型简化实例分别为狗模型、牛模型、手模型和恐龙模型,实验数据为4种模型在不同简化率下的简化误差。

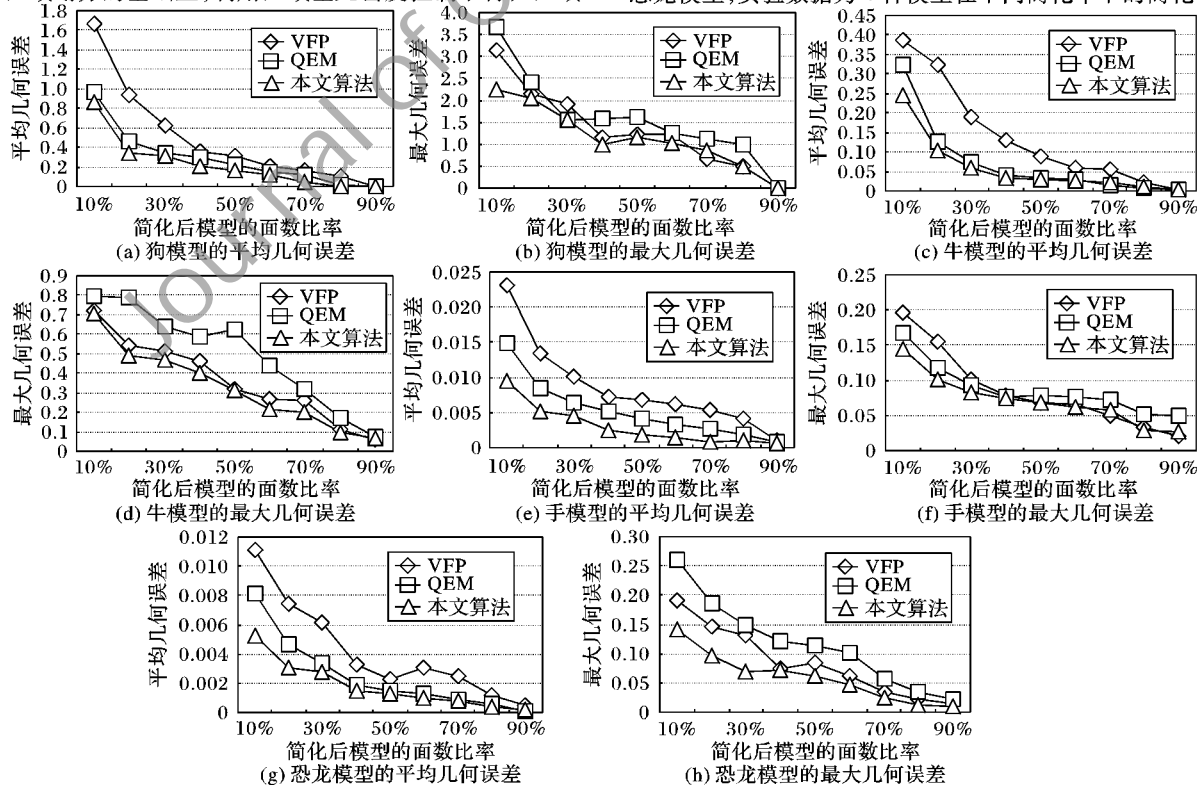


图7 DCM、VFP、QEM 和本文算法的简化质量对比

由实验数据可以看出,对于狗模型,本文算法的平均几何误差比算法 QEM 降低了 6%~28%,比算法 VFP 的平均误差降低了 6%~36%;最大几何误差比算法 QEM 降低了 2%~11%。对于牛模型,本文算法的平均几何误差比算法 QEM 降低了 19%~25%,比算法 VFP 降低了 16%~37%;最大几何误差比算法 QEM 降低了 6%~20%。对于手模型,本文算法的平均几何误差比算法 QEM 降低了 22%~36%,比算法 VFP 降低了 30%~72%;最大几何误差比算法 QEM 降低了 6%~28%。对于恐龙模型,本文算法的平均几何误差比算法 QEM 降低了 11%~33%,比算法 VFP 降低了 43%~68%;最大几何误差比算法 QEM 降低了 11%~41%。综上所述,无论是最大几何误差,还是平均几何误差,本文算法的模型简化质量均优于算法 VFP 和算法 QEM 的模型简化质量。

4 结语

本文提出一种多特征融合的网络模型简化算法,目标是保持简化模型的视觉特征信息。算法在分析模型特征信息和多种基元重要度量方法的基础上,采用二次误差度量模型几何特征、利用挠率度量模型的视觉特征,并利用法向特征因子加权二次误差,利用三角形形状因子加权挠率,组成多特征融合的重要度量方法,引导模型简化序列。本文算法优先简化三角形形状不好的单元,提高了模型简化算法的正确性,减少了模型简化算法的过简化和失真现象,从而提高了简化模型质量。

参考文献:

- [1] GONZALEZ C, GUMBAU J, CHOVER M, *et al.* User-assisted simplification method for triangle meshes preserving boundaries [J]. *Computer-Aided Design*, 2009, 41(12): 1095–1106.
- [2] YAN J Q, SHI P F, ZHANG D. Mesh simplification with hierarchical shape analysis and iterative edge contraction [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2004, 10(2): 142–151.
- [3] CHUAN A T S, ZHANG J H. Multi-edge decimation in multi-modal 3D collaborative applications [C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia*. New York: ACM Press, 2009: 88–94.
- [4] 王选明, 吴菊英, 吴恩华. 基于面删除的四面体网格简化新算法 [J]. *电子学报*, 2007, 35(12): 2343–2346.
- [5] QU L, MEYER G W. Perceptually guided polygon reduction [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2008, 14(5): 1015–1029.
- [6] MENZEL N, GUTHE M. Towards perceptual simplification of models with arbitrary materials [J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(7): 261–270.
- [7] GARLAND M, HECKBERT P S. Simplification using quadric error metrics [C]// *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press, 1997: 209–216.
- [8] HUSSAIN M, OKADA Y, NIJIMA K. Efficient and feature-preserving triangular mesh decimation [J]. *Journal of WSCG*, 2004, 12(1/2/3): 167–174.
- [9] PARK I, SHIRANI S, CAPSON D W. Mesh simplification using an area-based distortion measure [J]. *Journal of Mathematical Modeling and Algorithms*, 2006, 5(3): 309–329.
- [10] TANG H, SHU H Z, DILLENSEGER J L, *et al.* Moment-based metrics for mesh simplification [J]. *Computers & Graphics*, 2007, 31(5): 710–718.
- [11] 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.
- [12] SCHRODER F, ROSSBACH P. Managing the complexity of digital terrain models [J]. *Computer & Graphics*, 1994, 18(6): 775–783.
- [13] KIM S J, JEONG W K, KIM C H. LOD generation with discrete curvature error metric [EB/OL]. [2013-03-20]. <http://kucg.korea.ac.kr/people/sjkim/paper/ik99.pdf>.
- [14] HOPPE H. New quadric metric for simplifying meshes with appearance attributes [C]// *Proceedings of the 1999 IEEE Visualization Conference*. Piscataway: IEEE Press, 1999: 59–66.
- [15] WU Y, HE Y, CAI H. QEM-based mesh simplification with global geometry features preserved [C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia*. New York: ACM Press, 2004: 50–57.
- [16] LI L, HE M Y, WANG P. Mesh simplification algorithm based on absolute curvature-weighted quadric error metrics [C]// *Proceedings of the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. New York: ACM Press, 2010: 399–403.
- [17] LINDSTROM P, TURK G. Fast and memory efficient polygonal simplification [C]// *Proceedings of the 1998 IEEE Visualization Conference*. Piscataway: IEEE Press, 1998: 279–286.
- [18] 杜晓晖, 尹宝才, 孔德慧. 基于加权二次误差测度的边折简简化算法 [J]. *北京工业大学学报*, 2007, 33(7): 731–736.
- [19] KANAYA T, KOBORI K. Real time simplification in polygon environment [C]// *Proceedings of the 9th International Conference on Human-Computer Interaction*. New York: ACM Press, 2001: 223–224.
- [20] WEI J, LOU Y. Feature preserving mesh simplification using feature sensitive metric [J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2010, 25(3): 595–605.
- [21] THOMAS D M, YALAVARTHY P K, KARKALA D, *et al.* Mesh simplification based on edge collapsing could improve computational efficiency in near infrared optical tomographic imaging [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(4): 1493–1501.
- [22] SHI Z F, LUO H, NIU X M. Saliency-based structural degradation evaluation of 3D meshes simplification [J]. *IEICE Electronics Express*, 2011, 8(3): 161–167.
- [23] LAVOUE G, CORSINI M. A comparison of perceptually-based metrics for objective evaluation of geometry processing [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2010, 12(7): 636–649.
- [24] COHEN S D, ALLIEZ P, DESBRUN M. Variational shape approximation [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 905–914.
- [25] SUN X F, PAUL R L, RALPH R M, *et al.* Fast and effective feature-preserving [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(5): 925–938.