

基于顶点重要度的保形网格简化方法研究

董艳, 张志毅⁺, 杨客

(西北农林科技大学 信息工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为解决许多网格简化方法不能很好地保持模型的重要几何特征问题, 提出基于顶点重要度和三角剖分的边折叠简化算法。算法通过特征因子加权顶点重要度作为边的折叠代价, 定义法向量夹角因子, 控制边的折叠顺序; 在折叠过程中对边界特征区域进行冻结处理, 以保持模型总体轮廓特征; 采用边中点折叠和边邻域网格重建方法完成折叠操作。实验结果表明, 模型在大规模简化后, 该方法能较好地保持模型的几何特征。

关键词: 顶点重要度; 边折叠; 二次误差测度; 三角网格重建; 网格简化

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7024 (2013) 05-1889-07

Research of algorithm for shape preserving triangular mesh simplification based on important degree

DONG Yan, ZHANG Zhi-yi⁺, YANG Ke

(College of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to solve the problems of the feature loss during mesh simplification algorithms, an Edge collapse simplification algorithm is proposed that based on the importance of vertex and triangulation mesh. In this algorithm, weight of vertex is used to calculate the collapse cost of edge, vector angle factor is defined to control the folding sequence of edges. In order to keep the characteristics of the model and improve the efficiency of the algorithm, the boundary characteristic regions could be freed. Finally, edge's midpoint and mesh reconstruction of edge adjacent field are used respectively for finalizing folding procedure. Experimental results show that the method can well maintain the characteristics of the model after massive simplification.

Key words: weight of vertex; edge collapse; quadric error metrics; triangular mesh reconstruction; mesh simplification

0 引言

随着三维扫描技术与图像获取技术的不断发展, 获取海量的三维数据信息愈加容易, 这些海量数据信息的处理, 给计算机网络传输以及实时显示带来巨大的挑战, 因此如何快速较好地实施网格简化一直是计算机图形学研究的热点问题之一。Schroeder等人提出的基于顶点删除的表面模型简化方法, Garland等人^[1]提出的基于二次误差 (quadric error metric, QEM) 的简化方法, Hoppe等人^[2]采用的能量优化方法实施简化。这些方法, 在简化过程中由于没有考虑模型的整体特征, 导致特征边界在简化过程中容易消失。千学明等人^[3]提出基于限定误差界的三角网格简化方法, 运用顶点去除法简化网格模型, 实现简化效率与简化

误差的双重控制, 效果较好, 但是, 需要人为设定限定误差界的范围; 薛峰等人^[4]提出基于外形保持的网格简化算法, 在进行大规模简化后仍能较好地保持原始模型的视觉特征, 但是在简化过程中带有边界和孔洞的模型不能有效地处理; 韦虎等人^[5]提出基于支撑域的网格简化算法, 能较好地保持了初始网格的细征, 较为明显地降低简化误差, 但时间与空间复杂度较高; 董方敏、唐慧等人^[6-7]采用不同策略的边折叠简化算法, 在计算复杂度、尖特征度保持以及效果等方面均有待改进。

本文对边折叠算法进行研究, 依据顶点的重要程度决定边的折叠次序, 抽取合适的边进行折叠。在折叠过程中, 对边界点、边界边进行冻结判断, 定义边与面的夹角因子建立不可折叠区域, 实现在保持模型的边界特征和细节特

收稿日期: 2012-08-30; 修订日期: 2012-11-07

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动费基金项目 (K314020901); 中央高校基本科研业务费专项基金项目 (Z109021004)

作者简介: 董艳 (1987-), 女, 黑龙江富锦人, 硕士研究生, 研究方向为计算机图形学; +通讯作者: 张志毅 (1974-), 男, 山西运城人, 博士, 研究方向为计算机辅助设计与图形学; 杨客 (1989-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为计算机图形学。

E-mail: 506390367@qq.com

征的前提下，实施网格的较大规模简化。

1 相关知识

由于网格特征的复杂性与多样性，通常采用海量的三角网格对模型进行描述。常用的简化方法主要有自适应细分、顶点聚类、区域合并、几何元素删除、小波分析等。因几何元素删除方法是依据原始模型进行相关的简化，故能较好地保留原始模型的拓扑信息，因而被广泛采用。几何元素删除方法是指在保持了一定的几何误差的前提下，删除对原始模型影响较弱的几何元素，主要包括顶点删除、边折叠，三角形收缩^[8]等。其中，边折叠方法具有简单、方便、误差较小的特点，在网格简化过程中较为常见。

本文采用边折叠实施简化，如图1所示，边折叠简化算法的关键问题包含两个方面，即“待折叠边”的选取与新顶点位置的确定。

1.1 基本概念

为了描述方便，本文给出一些符号和基本概念的描述：

定义1 称与顶点 v 直接关联的顶点集合为“邻居环”顶点集（或关联顶点），记为 V_v ，包含顶点 v 的边，称 v 的“关联边”。如图1所示，顶点 v_0 的“邻居环”顶点集为 $V_{v_0} = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_6\}$ 。

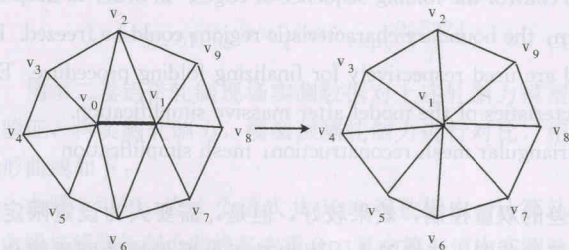


图1 边折叠过程

定义2 针对非边界边，称“折叠代价”最小的边为“待折叠边”，用新顶点坐标替换“待折叠边”关联的顶点坐标，即完成“边折叠”操作。

定义3 “区域冻结”包含“顶点冻结”和“边冻结”。前者是指，对顶点“邻居环”顶点集添加不可折叠标记，即，与“待折叠边”直接关联的顶点不参与“边折叠”操作；后者是指，当边的一个顶点被标记为不可折叠时，该边被称为“被”冻结边。

1.2 网格顶点的二次误差

采用 Garland 提出的二次误差测度 (quadric error metric, QEM) 算法，计算顶点的二次误差，其计算简单且有较好的质量。QEM 表示的是一个顶点到二次曲面的距离，定义 $D_p^2(v)$ 为平面外任意顶点 v 到平面 P 的距离的平方和，即

$$D_p^2(v) = (p^T v)^2 = v^T (pp^T) v = v^T (K_p) v \quad (1)$$

其中，设平面方程为： $ax + by + cz + d = 0$ ，且满足 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ ，令 $P = [a, b, c, d]^T$ 代表该平面，顶点 v 的坐标表示为 $[x, y, z, 1]^T$ ，其中，基本误差二次型 K_p 定义如下

$$K_p = pp^T = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

定义网格顶点的二次误差为顶点 v 到顶点其关联的所有平面的距离的平方和，记作 $\epsilon(v)$ 。设顶点的二次误差矩阵为 $Q(v)$ ，即

$$Q(v) = \sum_{p \in S} K_p \quad (3)$$

$$\epsilon(v) = v^T \left(\sum_{p \in S} K_p \right) v = v^T Q(v) v \quad (4)$$

1.3 网格顶点的法矢量

网格顶点处的法矢量变化一般会对网格模型的绘制结果产生影响。本文采用面积加权的三角面法矢量^[9]来计算顶点处的法矢量。式(5)中 n_v 表示顶点 v 处的单位法矢量。

$$\bar{n}_v = \frac{1}{\sum A_T} \sum n_T A_T, n_v = \frac{\bar{n}_v}{\|\bar{n}_v\|} \quad (5)$$

式中： A_T ——与顶点 v 相关的三角形 t_i ($t_i \in T$) 的面积。三角形的面积可以通过“海伦公式”或向量“叉积”^[10]（也称“叉乘”）求得。由于在计算边折叠代价时涉及到顶点的法向量求解问题，为使用方便，本文采用空间中向量“叉积”求解面积。

1.4 算法的时间复杂度

本文采用基于特征因子加权顶点重要度作为边的折叠代价，使用冒泡排序算法将边的折叠代价加入到简化的优先队列中。当进行简化时，从简化的优先队列中选择 m ($m \ll n$) 条边实施简化操作，同时更新邻域范围内受影响的边的折叠代价；当对边的邻域网格进行重建时，仍采用冒泡排序算法对虚边值进行排序，故本文的时间复杂度约为 $O(mn^2)$ 。

2 基于顶点重要度的边折叠简化

2.1 顶点的重要度

根据人类视觉系统的特征，当观察物体时，会对棱角、棱边及轮廓等关键特征比较敏感，对平坦区域的感知度较弱，因此位于关键处的顶点对于维持网格模型的整体形状特征十分重要。顶点处的起伏程度越大，去除该顶点后对网格模型的影响越大，即顶点的重要程度越大，故本文将边关联的顶点的二次误差作为顶点的重要度。

2.2 边折叠代价

因“待折叠边”邻域的关联三角面，都有把“待折叠边”拖向自己的趋势，面积越大，其趋势越明显。因此将

面积归为影响“待折叠边”选取的特征因素集, 对顶点的重要度进行特征加权; 同时若待折叠的长度越大, 折叠之后, 网格的形变就会愈加明显, 故应先折叠边长较小的边。经过特征因子加权后的边的叠代价 $Cost_{edge}$ 定义如下

$$Cost_{edge} = \frac{(\epsilon'_u + \epsilon'_v)}{\sum_{p \in S_i, q \in S_j} (A_p + A_q)} |u - v| \quad (6)$$

其中: ϵ'_u 、 ϵ'_v ——顶点 u 、 v 修正后二次误差, $|u - v|$ 为“待折叠边”的长度, $\epsilon'_u = v^T Q(v)v$, $Q(v)' = \sum (K_p \cdot A_p)$, 同理可得 ϵ'_v 。

在边折叠过程中, 边邻域范围内会出现局部特征变化明显的区域, 如图 2 (a) 所示, 此类边如果被折叠, 容易出现部分三角面发生翻转的情况, 导致形成的新网格模型出现孔洞甚至错误, 因此, 为了避免折叠此类边, 为“待折叠边”定义两个夹角因子, 以控制边的折叠顺序。

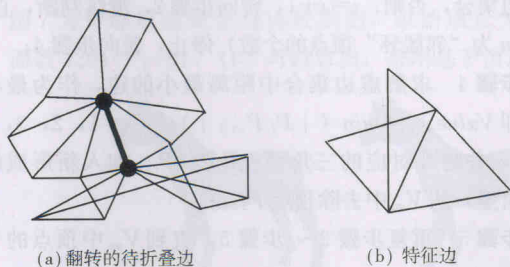


图 2 特殊边处理

2.2.1 关联顶点夹角因子 EV_{uv}

定义“待折叠边”关联的两个顶点方向向量之间的夹角为顶点夹角因子, 记作 EV_{uv} 。若两个关联顶点的夹角 α 小于 45° , 则说明“待折叠边”邻域范围内关联平面的共面几率越大, 此类边在折叠过程中应考虑优先折叠。法向量之间的夹角采用向量的“点积”进行求解, 式 (7) 为夹角因子 EV_{uv} 的表达式

$$EV_{uv} = \cos(\mathbf{n}_u, \mathbf{n}_v) \quad (7)$$

式中: \mathbf{n}_u 、 \mathbf{n}_v ——顶点 v_u 、 v_v 处的法向量。

2.2.2 外法向量夹角因子 EF_{uv}

定义共用“待折叠边”的两个三角面的法平面矢量的夹角为平面夹角因子, 记作 EF_{uv} 。三角面之间的夹角又称平面的二面角, 即平面的外法向量之间的夹角的补角。若外法向量之间的夹角 β 大于 45° , 说明该边邻域变化较为明显, 规定此类型的边为棱边, 在简化时, 应尽量保留, 优先折叠三角面间外法向量夹角较小的边。式 (8) 为平面夹角因子 EF_{uv} 的表达式

$$EF_{uv} = \cos(\mathbf{n}_{f1}, \mathbf{n}_{f2}) \quad (8)$$

式中: \mathbf{n}_{f1} 、 \mathbf{n}_{f2} ——与“待折叠边”关联的两个三角面的平面法向量。

上述两个夹角因子在选择“待折叠边”时需要综合考

虑, 若某“待折叠边”不满足两个夹角因子的限定条件, 则标记该边为不可折叠边。

考虑到边折叠后会出现狭长的三角形。本文对新形成的三角形正则度进行评价。三角形正则度评价的方法常用的有三种, 边长法, 面积法, 角度法, 由于面积法与边长法不能直观地反应出正则度随角度变化的情况, 故本文采用角度法^[11]衡量三角形的正则度。当新形成的三角形的正则度较差时, 标记关联的“待折叠边”为不可折叠边。

2.3 边界区域处理

针对部分模型存在边界或孔洞区域, 为了避免轮廓曲线上的边被折叠, 需要对边界和孔洞区域进行特殊处理。本文采用“冻结”的方式对边界和孔洞区域进行限定, 使之少参与或不参与“边折叠”操作过程, 从而较完整地保留边界处的轮廓特性。若精度没有达到要求, 在对相应的顶点和面进行解冻, 使其参与相关的折叠操作。

此外, 在原始网格模型或者新形成的网格模型中, 往往会存在某一边被两个以上的面共用的情况, 如图 2 (b), 此类边支撑网格模型的基本形状, 去除之后会给模型的整体轮廓带来较大的影响, 故将此类边视为特征边, 在简化过程中应进行保留。

2.4 新顶点位置

找到“待折叠边”之后, 确定新顶点的位置至关重要, 这里采用刘晓利^[12]的方法, 确定新顶点 v_0 的坐标, 即

$$v_0 = -A^{-1}B \quad (9)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac \\ ab & b^2 & bc \\ ac & bc & c^2 \end{bmatrix}$, $B = [ad \quad bd \quad cd]^T$ 。

若 A 可逆, 则新顶点的坐标为 v_0 的坐标为 $-A^{-1}B$, 否则, 则从 v_1 , v_2 , $(v_1 + v_2) / 2$ 中选择折叠代价最小的点作为新的顶点, 但考虑到选取端点作为新顶点, 新形成的三角面的正则度较差, 且网格的形变过大, 故本文当 A 不可逆时, 选取两个顶点的中点位置作为新顶点 v_0 的位置。

2.5 算法流程

基于顶点重要度的边折叠简化算法的基本流程归纳如下:

- 步骤 1 读取模型数据, 建立每个顶点周围点、边、面基本关系;
- 步骤 2 计算每个顶点处的方向向量, 每个顶点的二次误差;
- 步骤 3 计算两个夹角因子 EV_{uv} 、 EF_{uv} ;
- 步骤 4 遍历每条边并计算边的折叠代价, 将不满足夹角因子限定的边添加“不可折叠”标记, 边界区域添加冻结标记;
- 步骤 5 针对可折叠边, 对边的折叠代价进行升序排列加入到简化的优先队列中去;
- 步骤 6 从优先简化的队列中 (队首) 选取折叠代价最

小且未标记“冻结”的边作为“待折叠边”，并对其邻域顶点和边添加“冻结”标记；

步骤 7 计算新顶点 v 的坐标值，用顶点 v 替换“待折叠边”的两个顶点，完成折叠操作，更新关联边的相关信息，转向步骤 6；

步骤 8 反复执行步骤 6 至步骤 7 步骤，直到满足折叠顶点或面的数目要求，算法终止。

3 基于三角剖分的边折叠简化

因基于“顶点删除”和“边折叠”的简化方法每次只能简化掉一个顶点，二个三角面元，若要到达顶点或面的简化数目要求，需要多次执行折叠操作，每次折叠均需重新计算新顶点的位置坐标。将边折叠方法与三角剖分相结合每次可折叠掉二个顶点，4 个三角面元，只需执行几次折叠操作，即可达到简化的要求，因重建后形成的网格模型所用的顶点均为原始模型中存在的点，能够较好地保证连续简化网格间形变不过大，且形成的三角形正则度较好。因此，本文根据顶点重要度的边折叠简化算法选取“折叠边”的规则选择“待折叠边”，然后对“待折叠边”邻域范围进行网格重建，完成网格简化操作。

当非边界边被折叠后，与该边两个顶点关联的三角形将会退化，这样就会形成一片空白区域，如图 4 (b)，对这个空白区域进行三角剖分，就是网格重建过程。根据重建过程中采用的具体方法可以将网格重建算法分为基于 Delaunay 重建法、区域扩张重建法、基于隐式曲面重建法和基于统计学重建法。其中，基于 Delaunay 三角网重建^[13]方法，具有很强的数学基础，重建后的三角面较为规则，但计算量比较大。因此，本文采用千学明的方法，通过计算最小虚边，来实施空白区域的网格重建问题。

由于在三维空间中判断三角面是否在某一个空间区域中计算较为复杂，并且顶点的凹凸性不同，会导致计算的最小虚边出现在“邻居环”区域之外，这样的虚边在重建过程中应该舍去。本文通过判断顶点的凹凸性，对凹顶点，进行标记，使之对应的边不参与最小虚边的比较计算。实验表明，该方法可以正确地进行网格重建。

3.1 顶点的凹凸性判断

顶点凹凸性判断，主要有向量法、射线法、斜率法等。本文采用下面方法，可以快速的判断顶点的凹凸性。

首先，记顶点 v “邻居环”区域的平均法平面矢量为 n ，逆时针方向任意取“邻居环”3 个相邻的顶点 P 、 Q 、 R ，计算其组成的三角平面的法平面矢量 w 。令 $u = PQ$ ， $v = QR$ ， $w = uv$ ，若 $w \times n \geq 0$ 。则顶点 Q 为凸顶点，否则为凹顶点。

3.2 算法流程

对“待折叠边”邻域范围，实施如下的步骤，完成网格简化操作。具体实现步骤描述如下：

步骤 1 逆时针构建“待折叠边” $P_k P_{k+1}$ 的“邻居环”顶点集合，如图 3 (a) 所示，边 $P_u P_v$ “邻居环”顶点集合为 $V_w = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_8\}$ ；

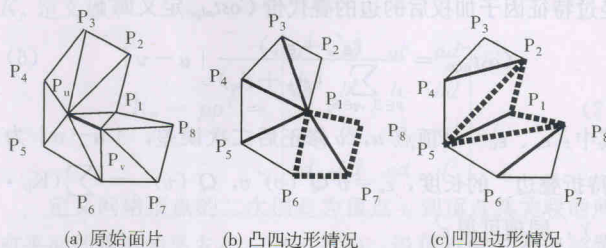


图 3 网格重建过程

步骤 2 在“邻居环”顶点集合中，按逆时针方向任意选取 3 个顶点 P_i, P_{i+1}, P_{i+2} ，判断顶点 P_{i+1} 的凹凸性；

步骤 3 若顶点 P_{i+1} 为凸顶点，则将距离 $|P_i P_{i+2}|$ 加入虚边集合，否则， $i = i + 1$ ，转向步骤 2，继续判断，直至 $i = n$ (n 为“邻居环”顶点的个数) 停止，转向步骤 4；

步骤 4 求解虚边集合中距离最小的边，作为最小虚边，即 $Value_{edge} = \min(|P_i P_{i+2}|)$ ，($i = 1, 2, 3, \dots, n - 2$)，并将其对应的三角面 $\triangle P_i P_{i+1} P_{i+2}$ 加入新形成的三角面组里，从 V_w 中去除顶点 P_{i+1} ；

步骤 5 重复步骤 2~ 步骤 5，直到 V_w 中顶点的个数大于 4；

步骤 6 网格模型在重建过程中，当“待剖分”的空白区域的“邻居环”的顶点个数等于 4 时，剩余的 4 个顶点时可能出现图 3 (b) (凸四边形 $P_1 P_6 P_7 P_8$) 与图 3 (c) (凹四边形 $P_1 P_2 P_5 P_8$) 的情况，需要根据具体的情况分别处理，才不会出错。若四边形为：

凸四边形，则计算两条对角线的长度，选取最小的长度对应的边作为公共边进行剖分，如图 3 (b) $P_1 P_7$ ；

凹四边形，则直接连接凹顶点与其所对应的顶点作为公共边进行剖分；如图 3 (c) 中边 $P_1 P_5$ ；

步骤 7 当 V_w 中只包含 3 个顶点时，逆时针取 3 个顶点，直接加入新形成的三角面组。

通过以上的 7 个步骤完成网格模型重建，图 4 (a) - (c) 给出网格模型从“待折叠边”选取到重建的全部过程。

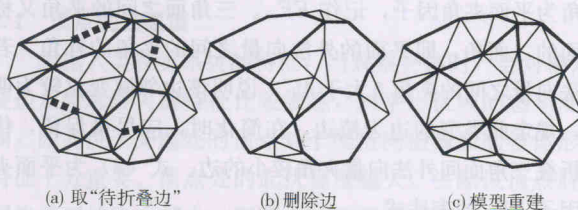


图 4 基于三角剖分的边折叠简化过程

4 实验结果

本算法开发环境是 Visual C++ 6.0，利用 OpenGL 语

言编程实现。下面采用具有代表性的几个模型, 对基于顶点重要度边折叠简化方法与基于三角剖分的边折叠简化方法进行验证。

图 5 为采用基于顶点重要度的边折叠简化方法的简化过程图。原始马模型共有 4850 个点, 9696 个面。观察图 5 (b)、(c)、(d) 中马模型的耳朵及腿部等细节处, 当简化率达到 91.81% 时, 模型的细节特征仍能得到较好地保持。文献 [4] 算法依据顶点的坍塌值的大小, 选定边的折叠顺序, 较有效地实现表面曲率变化不大的网格模型的简化, 并能保留原始模型的视觉特征, 当简化率小于 60% 的情况下, 与本文基于顶点重要度的边折叠简化方法的简化效果相近。但当简化率继续提高之后, 本文算法的细节特征保持较好。

图 6 为基于顶点重要度的边折叠简化方法与文献 [4] 简化方法的结果对比图, 由图 6 (b) 中可以看出, 本文方法在马的腿部以及头部等细节处均得到较好地保持。

图 7 为骨骼模型简化对比效果图, 原始顶点为 2154 个, 面数 4204 个。图 7 (b) 可以看出, 采用基于顶点重要

度的边折叠简化方法, 当模型简化到 82.26% 时, 仍能较好地保持骨骼的趾部外形特征。

图 8 为采用基于三角剖分边折叠简化方法进行简化的效果图。原始女士头像模型共有顶点 8105 个, 面数为 15816 个。由图 8 (b)~(d) 可知, 当简化率达到 92.99% 时, 眼睛、鼻子、嘴等处都得到了较好地保持。

图 9 为基于顶点重要度的边折叠简化方法与基于三角剖分的边折叠简化方法的简化效果对比图, 其中, 图 9 (a)、9 (c) 为基于顶点重要度的边折叠简化方法的简化结果图; 图 9 (b)、9 (d) 为基于三角剖分的边折叠简化方法的简化结果图, 两种方法在简化率在 40%~70% 之间, 简化的效果相近。由图 9 (c)~(d) 可知, 基于三角剖分边折叠简化方法对牛模型的腿部和腹部有较好地保持。

使用基于顶点重要度的边折叠简化方法与基于三角剖分的边折叠简化方法对多组模型进行简化, 表 1 给出了几组模型原始数据、简化率及简化时间等信息。

由表 1 分析可知, 使用两种简化方法进行大规模的简

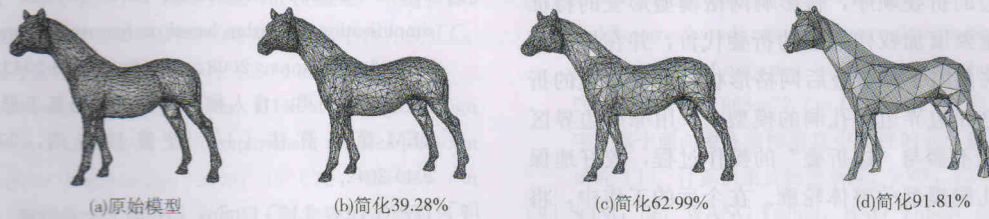


图 5 马模型简化过程



图 6 马模型简化对比

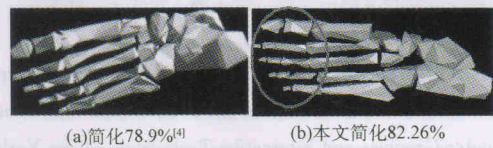


图 7 足部骨骼模型简化对比

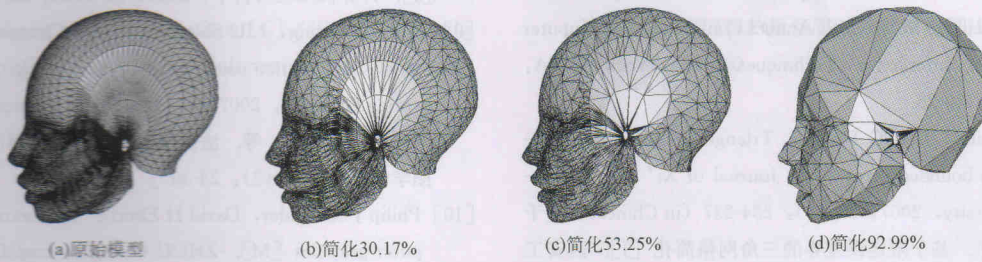


图 8 女士头像模型简化过程



图 9 本文两种简化方法对比效果

化时,对光滑模型和不光滑模型同样适用,当原始顶点4850,面数9696时,采用基于顶点重要度的边折叠简化方法进行简化时,当简化率为56.5%,所用的时间为6.38s,当简化的率为91.81%时,所用的时间为8.24s.采用基于三角剖分的边折叠简化方法,由于在网格重建过程中需要

对顶点的顺序进行判断,且需要通过判断最小虚边来完成三角剖分,故所用的时间要稍长一些,但获得相似的简化效果时,简化率要稍高于基于顶点重要度的边折叠简化方法.由图9对比可知,当简化率较高时,两种方法均能较好地保持模型的细节特征.

表1 模型简化率与时间表

	原始面数 (单位:个)	基于顶点重要度的边折叠方法				基于三角剖分的边折叠方法			
		简化率	时间	简化率	时间	简化率	时间	简化率	时间
恐龙模型	4000	52.1%	1.46s	78.55%	2.10s	59.80%	4.56s	81.50%	5.88s
牛模型	5804	46.8%	2.88s	85.87%	3.54s	53.27%	5.98s	86.22%	8.37s
马模型	9696	56.5%	6.38s	91.81%	8.24s	61.22%	10.19s	91.93%	13.06s
头像模型	15816	56.7%	8.14s	92.20%	10.48s	53.25%	13.26	92.99%	15.47s

5 结束语

本文基于边折叠方法实施简化,其特点是以顶点的重要程度来决定边的折叠顺序,将影响网格模型形变的特征因子与顶点的重要度加权作为边的折叠代价,并在折叠过程中通过两个夹角因子和折叠后网格形状因子控制边的折叠情况.针对存在边界边和孔洞的模型,采用冻结边界区域的方法,使之不参与“边折叠”的操作过程,较好地保持边界模型和孔洞模型的整体轮廓.在今后的工作中,将进一步优化算法的数据结构,提高简化效率以处理更为复杂的网格模型.

参考文献:

[1] Garland M, Heckbert P S. Surface simplification using quadric error metrics [C] //Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM, 1997: 209-216.

[2] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, et al. Mesh optimization [C] //Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM, 1993: 19-26.

[3] QIAN Xueming, JIANG Pingyu. Triangular mesh simplification based on bounded error [J]. Journal of Xi' An Technological University, 2007, 27 (3): 234-237 (in Chinese). [千学明, 江平宇. 基于限定误差界的三角网格简化 [J]. 西安工业大学学报, 2007, 27 (3): 234-237.]

[4] XUE Feng, YUAN Chengfeng. Mesh simplification algorithm based on keeping shape feature [J]. Journal of Computer Application, 2010, 30 (9): 2431-2433 (in Chinese). [薛峰, 袁成凤. 保持外形特征的网格简化算法 [J]. 计算机应用, 2010, 30 (9): 2431-2433.]

[5] WEI Hu, ZHANG Liyan, LIU Shenglan, et al. Mesh simplification based on support region [J]. Journal of Image and

Graphics, 2011, 16 (5): 892-897 (in Chinese). [韦虎, 张丽艳, 刘胜兰, 等. 基于支撑域的网格简化算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16 (5): 892-897.]

[6] DONG Fangmin, LIU Yong, XIAO Renbin. Improved QEM simplification algorithm based on features preserved [J]. Computer Applications, 2008, 28 (8): 2040-2042 (in Chinese). [董方敏, 刘勇, 肖人彬. 一种改进的基于形状特征保持的QEM简化算法 [J]. 计算机应用, 2008, 28 (8): 2040-2042.]

[7] TANG Hui, LUO Limin, ZHOU Zhengdong. A mesh simplification method based on curvature of curves [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13 (11): 2224-2230 (in Chinese). [唐慧, 罗立民, 周正东. 基于曲线曲率的网格简化方法 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13 (11): 2224-2230.]

[8] YAN Tao, JIANG Xiaofen, WANG Yu. The research based on the simplification of the triangular mesh model [J]. Computer Engineering & Science, 2010, 32 (12): 69-72 (in Chinese). [闫涛, 姜晓峰, 王昱. 基于三角网格模型简化的研究 [J]. 计算机工程与科学, 2010, 32 (12): 69-72.]

[9] CHEN Youping, LIU Shiqing, YUAN Chuming, et al. Mesh model simplification using normal vectors [J]. Journal of Engineering Graphics, 2007 (2): 23-30 (in Chinese). [陈幼平, 刘仕庆, 袁楚明, 等. 法向量法实现网格模型简化 [J]. 工程图学学报, 2007 (2): 23-30.]

[10] Philip J Schneider, David H Eberly. Geometric tools for computer graphics [M]. ZHOU Changfa, transl. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 80-84 (in Chinese). [Philip J Schneider, David H Eberly. 计算机图形学几何工具算法详解 [M]. 周长发, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 80-84.]

[11] YAN Tao, JIANG Xiaofeng. Research Triangular mesh model simplification based on STL [J] Computer Engineering and Design, 2010, 31 (23): 5060-5064 (in Chinese). [闫涛, 姜晓峰. 基于STL三角网格模型简化的研究 [J]. 计算

机工程与设计, 2010, 31 (23): 5060-5064.]

- [12] LIU Xiaoli, LIU Zeyi, GAO Pengdong, et al. Edge collapse simplification based on sharp degree [J]. Journal of Software, 2005, 16 (5): 669-675 (in Chinese). [刘晓利, 刘则毅, 高鹏东, 等. 基于尖特征度的边折叠简化算法 [J], 软件学报, 2005, 16 (5): 669-675.]
- [13] YU Jie, LV Pin, ZHENG Changwen. A comparative research on methods of Delaunay triangulation [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15 (8): 1158-1167 (in Chinese). [余杰, 吕品, 郑昌文. Delaunay三角网构建方法比较研究 [J], 中国图象图形学报, 2010, 15 (8): 1158-1167.]
- (上接第 1878 页)
- 参考文献:**
- [1] LIAO Xiaoping, WANG Zhijian, LIU Shan. Active service platform based on xml and publishing/subsclution mechanism [J]. Computer Application and Software, 2009, 26 (1): 205-209 (in Chinese). [廖小平, 王志坚, 刘山. 基于XML和发布/订阅机制的主动服务系统 [J]. 计算机应用与软件, 2009, 26 (1): 205-209.]
- [2] XIE Chunxiang, ZHANG Hong, NIE Yuman. Development of SMS terminal based on GSM/GPRS [J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28 (7): 1680-1682 (in Chinese). [谢春祥, 张虹, 聂余满. 基于GSM/GPRS的终端式短信平台开发 [J]. 计算机工程与设计, 2007, 28 (7): 1680-1682.]
- [3] CHEN Chaoxiang, DING Jianlong, CHEN Farong. Design and realization of intelligent SMS employment services platform [J]. Computer Engineering, 2009, 35 (7): 191-194 (in Chinese). [陈超祥, 丁健龙, 陈发荣. 智能短信就业服务平台的设计与实现 [J]. 计算机工程, 2009, 35 (7): 191-194.]
- [4] WEN Feng, WU Zhaolin, QIN Yanfeng. Design and implementation of metadata-based translated MIS [J]. Computer Applications and Software, 2011, 28 (4): 242-244 (in Chinese). [文峰, 吴照林, 秦艳峰. 基于元数据的解释型MIS的设计与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2011, 28 (4): 242-244.]
- [5] KONG Lanju, LI Qingzhong. A metadata-driven cloud platform for delivery of SaaS applications [C] //Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation, 2011: 501-505.
- [6] Charles Crichton, Jim Davies, Jeremy Gibbons, et al. Meta-data-driven software for clinical trials [C] //Proceedings of the ICSE Workshop on Software Engineering in Health Care, 2009: 1-11.
- [7] SUN Xi, ZHUANG Lei, LIU Wen, et al. A customizable running support framework for autonomous components [J]. Journal of Software, 2008, 19 (6): 1340-1349 (in Chinese). [孙熙, 庄磊, 刘文, 等. 一种可定制的自主构件运行支撑框架 [J]. 软件学报, 2008, 19 (6): 1340-1349.]
- [8] ZHEN Fu, LIU Min, DONG Mingyu. SOA message-oriented middleware based system integration method for business process [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15 (5): 968-972 (in Chinese). [甄甫, 刘民, 董明宇. 基于面向服务架构消息中间件的业务流程系统集成方法研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15 (5): 968-972.]
- [9] SONG Jie, WANG Daling, BAO Yubin, et al. Study on a metadata-driven ETL approach [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2007, 27 (12): 2167-2173 (in Chinese). [宋杰, 王大玲, 鲍玉斌, 等. 一种元数据驱动的ETL方法的研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2007, 27 (12): 2167-2173.]
- [10] SHEN Bin, LI Xingguo, ZHONG Jinhong, et al. Real-time concurrent algorithm for short message control based on multi-queue and multithread [J]. Computer Engineering, 2008, 34 (8): 62-65 (in Chinese). [沈斌, 李兴国, 钟金宏, 等. 基于多队列和多线程的短信实时并发控制算法 [J]. 计算机工程, 2008, 34 (8): 62-65.]