

一种保持纹理的网面简化算法

贾云得 刘万春 裴明涛 朱玉文 李 莉

(北京理工大学计算机科学与工程系, 北京 100081)

摘要 在计算机视觉领域, 三维网面的简化不仅要求保持物体形状和拓扑关系, 还要求保持物体表面法线、纹理、颜色和边缘等物体特征, 以使计算机视觉系统能有效地表示、描述、识别和理解物体和场景, 为此讨论了一种基于边操作(边收缩, 边分裂), 并具有颜色或灰度纹理特征保持的三维网面的简化算法, 该算法将网面不对称最大距离作为形状改变测度, 将邻域内颜色或灰度最大改变量作为纹理改变测度, 从而在大量简化模型数据的同时, 有效地保持了模型的几何形状、拓扑关系、颜色或灰度特征以及网面顶点均匀分布。

关键词 网面简化 物体建模 纹理保持 计算机视觉

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)07-0613-05

Mesh Simplification with Texture Preservation

JIA Yun-de, LIU Wang-chun, PEI Ming-tao, ZHU Yu-wen, LI Li

(Department of Computer Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract Triangular mesh is widely used in 3D computer vision because meshes can model objects of arbitrary shape and are easily constructed from sensed 3D data. However the number of the triangles in the mesh is often very huge which makes later process costly. As a result, mesh simplification becomes a hotspot in computer vision. The Mesh simplification of 3D models for computer vision applications should preserve the shape, the topology and other attribute values (e. g. colors, textures, surface normals, edges, etc) of the object, which makes vision systems work effectively in the presentation, description, recognition and understanding of the object. This paper presents a mesh simplification algorithm with texture preservation by applying edge operations (edge-collapse, edge-split) to the whole surface mesh. The maximum asymmetric distance of the two meshes is computed as the shape change measure and the maximum texture distance of the two vertices in local neighborhood of the edge is computed as the texture change measure. This algorithm can reduce a great number of faces while preserving the object shape, the topology and texture features. The algorithm is also distributing the vertices of the mesh evenly over the surface of the object.

Keywords Mesh simplification, Object modeling, Texture preservation, Computer vision

0 概述

虽然计算机图形学中的网面简化方法可以推广到计算机视觉物体建模中, 但计算机图形学和计算机视觉对网面简化的要求不完全相同, 计算机图形学的网面简化注重视觉效果、可操作性和实时性, 主

要用于计算机动画、虚拟现实、人机交互和可视化方面; 而在计算机视觉领域, 其网面简化则更关注用于物体识别的特征保持, 以便有利于实现物体和场景的表示、描述、识别和理解。这些特征除了物体形状和拓扑关系外, 还有物体表面法线、纹理、颜色和边缘等。

近几年来, 许多研究人员开始研究能保持物体

基金项目: 国家“863”计划航天领域和博士点专项基金

收稿日期: 1999-11-29; 改回日期: 2000-11-29

模型更多特征和属性的算法,如 Johnson 和 Hebert^[1]利用边收缩和边分裂运算来实现模型简化,其简化准则除了几何形状保持不变外,还增加了网面顶点均匀分布准则.这种网面简化模型不仅适用于计算机视觉中的三维数据的配准,而且还适用于物体表面局部特性计算等. Garland 和 Heckbert 在二次曲面误差函数的网面简化算法的基础上,提出了具有颜色和纹理的物体网面模型简化的广义误差函数^[2],该方法通过映射的方式保持纹理,颜色信息附着在每个顶点上,顶点的坐标和颜色信息同时改变; Cignoni 等人分别提出了一种保持物体表面颜色和其他细节的网面简化方法^[3,4],这两种方法都采用映射纹理方法来保持整个物体的外观. 本文讨论了一种基于边操作(边收缩,边分裂),并具有颜色或灰度纹理特征保持的物体网面模型简化算法.该算法将网面不对称的最大距离作为形状改变的测度,并将邻域内颜色或灰度的最大改变作为纹理改变的测度.在大量简化模型数据的同时,有效地保持了模型几何形状、拓扑关系、颜色或灰度特征以及网面顶点的均匀分布.此算法是 Johnson-Hebert 提出的网面分辨率控制算法^[1]的推广,但他们的算法只针对网面形状数据的简化,而本文算法则不仅可简化三维形状的冗余数据,而且也可简化纹理或色彩的冗余数据.

1 网面简化的基本定义

在进行三角形网面简化过程中,可操作的基本要素有三角形、边和顶点.而在对每一个要素进行操作时,总是通过对其邻近基本要素的保持或改变来实现.

定义 1 收缩边邻域 $N_c(e)$:由收缩边的两个顶点、包含这两个顶点的三角形以及组成这些三角形的边和顶点组成.

定义 2 顶点邻域 $N(v)$,包含该顶点的三角形和组成这些三角形的边和顶点.

定义 3 分裂边邻域 $N_s(v)$,包含该分裂边的两个相邻接三角形以及组成这两个三角形的边和顶点.

定义 4 网面分辨率 L ,指网面上所有三角形边长的均值或中值(网面顶点均匀或近似均匀分布时,网面分辨率才有意义).

图 1 是收缩边邻域和顶点邻域的示意图,由图

上可见,边 e 收缩成一个顶点,同时去掉了边 e 、三角形 f_1 、顶点 v_1 和 v_2 .图 2 是分裂边邻域和分裂后生成的新顶点邻域示意图,由图 2 可见,边 e 在顶点 v 处分裂,从而增加了 3 条新边和两个新的三角形.

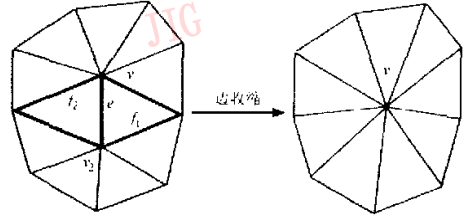


图 1 收缩边(星形)邻域和顶点(星形)邻域示意图

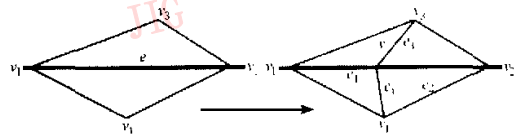


图 2 分裂边邻域和分裂后生成的新顶点邻域示意图

2 网面简化误差

2.1 形状改变误差

Johnson 将形状改变误差定义为边操作前的网面 M_1 与边操作后的网面 M_2 之间的最大距离^[1].由于网面是由线性元素(点、线、平面)的子集组成的, M_1 和 M_2 之间的最大距离是发生在 M_1 的顶点和 M_2 的某一个三角片之间,因此, M_1 和 M_2 的最大距离定义为 M_1 的顶点 v_i 和 M_2 上距 v_i 最近的三角片 f_j 上最近点 v_j 之间的欧几里得距离的最大值,即

$$d(M_1, M_2) = \max_{v_i \in M_1} \{ \min_{f_j \in M_2} \|v_i - v_j(v, f_j)\| \} \quad (1)$$

距离 $d(M_1, M_2)$ 是不对称的,即 $d(M_1, M_2)$ 和 $d(M_2, M_1)$ 一般不相等.形状改变误差 $S(M_1, M_2)$ 为两个网面距离的最大值,即

$$S(M_1, M_2) = \max[d(M_1, M_2), d(M_2, M_1)] \quad (2)$$

按照上述定义,边分裂时并不改变网面的形状.在实际应用中,由于每次边操作仅仅影响待操作边的星形邻域,因此,只计算星形邻域的形状改变误差即可.用两个网面间距离的最大值来表示形状改变,其优点是计算量小,且可以操作那些角、脊等表面形状不连续的边,同时还能保证角、脊在操作前后之间距离变化很小.

模型简化过程是对大量冗余边的操作过程,每次操作引起的网面形状改变虽然很微小,但多次操作则会形成较大的形状改变累积误差,因此,为了有效保持形状,就需要控制网面形状改变的总量.初始时,网面各边的形状改变累积误差 $S_A(e_i)$ 等于零,当某边 e 收缩后,根据式(2)计算出形状改变误差,然后将该误差加到新顶点 v 邻域 $N(v)$ 中所有边的累积误差 $S_A(e)$ 上.如果待收缩边 e 的累积误差 $S_A(e)$ 超过给定阈值 S_{\max} 时,则该边不再收缩.

2.2 纹理改变误差

纹理改变误差定义为收缩边邻域所有边的两个顶点纹理差之最大值.这里没有使用收缩边两个顶点的纹理差作为纹理改变误差,其原因是为了防止纹理改变剧烈的部分经边收缩操作后可能产生的严重锯齿化.设收缩边邻域 $N_c(e)$ 中的某一条边为 e_i ,其两个顶点对应的灰度值(或颜色值)分别为 t_{i1}, t_{i2} ,则边 e 收缩后的纹理改变误差定义为

$$T_e = \max_{e_i \in N_c(e)} \|t_{i1} - t_{i2}\| \quad (3)$$

每次操作引起的网面纹理改变虽然可能很微小,但多次操作则会形成较大的纹理改变累积误差,初始时,边 e_i 的纹理改变累积误差 $T_A(e_i)$ 由式(3)得出;当边 e 收缩时,纹理改变误差 T_e 就加到新顶点 v 邻域 $N(v)$ 中所有边 e_i 的纹理改变累积误差 $T_A(e_i)$ 上.通过控制每条边的纹理改变累积误差,就可以有效地控制整个网面纹理的改变量.如果待收缩边 e 的纹理改变累积误差 $T_A(e)$ 超过给定阈值 T_{\max} 时,则该边不再收缩.

3 新顶点位置及其属性的确定

一种简单的新顶点位置确定方法就是将新顶点的位置设置在收缩边的中点,但这种方法的最大缺点是一次操作可能会引起较大网面形状和纹理属性的改变,为此,文献[1]采用了一种称为中点投影平均法的算法来确定新顶点的位置.中点投影平均法就是指收缩边的中点向与该边邻接的所有三角形所决定的平面作投影,并取各投影点的平均值为新顶点的坐标.本文方法也属于中点投影平均法,但与文献[1]不同的是,本文方法不仅能确定新顶点的位置,同时也能确定顶点的纹理属性(或彩色属性).

设顶点用 n 维向量 $V \in R^n$ 来表示, V 的前3个元素表示该点的空间坐标,其余的元素表示该顶点

的属性值,比如,对于具有亮度属性的顶点用4维向量 $[x, y, z, l]^T$ 来表示,具有颜色属性的顶点可以用6维向量 $[x, y, z, r, g, b]^T$ 来表示.

对于收缩边 e ,其邻域中的某一个三角形 T 的3个顶点及其属性分别用4维或4维以上的向量 p, q, r 来表示,边 e 的两个端点为 v_1, v_2 .设 $h = q - p, k = r - p$,再取该收缩边的中点 $v_m = (v_1 + v_2)/2$,得到另一个向量 $l = v_m - p$;当 v_m 不在三角形 T 上时,就得到3个线性无关的向量 h, k, l .通过施密特正交化,就能得到如下3个互相正交的单位向量:

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{h}{\|h\|} \\ n_2 &= \frac{(k - (n_1, k)n_1)}{\|k - (n_1, k)n_1\|} \\ n_3 &= \frac{(l - (n_1, l)n_1 - (n_2, l)n_2)}{\|l - (n_1, l)n_1 - (n_2, l)n_2\|} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,向量 n_1, n_2 在三角形 T 平面上.

顶点 p 和向量 $n = n_3$ 构成一个超平面 T_i ,其方程为

$$Ax + By + Cz + Dr + Eg + Fb + G = 0 \quad (5)$$

式中, A, B, C, D, E, F 由式(4)决定, $G = -np$.

求与收缩边 e 邻接的所有三角形对应的超平面,然后将收缩边 e 的中点 v_m 向所有这些超平面作投影,其投影点坐标为 $v_m - n_i d_i$,其中 n_i 为超平面的法向量, $d_i = n_i v_m + G$,因此,新顶点的坐标为

$$\begin{aligned} v &= 1/N \sum_{i=1}^N (v_m - n_i d_i) \\ &= v_m - 1/N \sum_{i=1}^N (n_i v_m + G) n_i \end{aligned} \quad (6)$$

其中,新顶点坐标的前3个分量即为定位的空间位置坐标,而后面的其余分量则为顶点属性.

当 v_m 位于三角形 T 上时, v_m 本身就是到相应超平面的投影点,这时不必计算 n_i ,因为这时 $d_i = n_i v_m + G = 0$,所以可直接带入式(6)进行计算.

当进行分裂边时,新顶点位置选择在分裂边的中点,新顶点的纹理为分裂边顶点的纹理中值.因为分裂前后网面表面一样,分裂边操作形状改变量为零.将所有的分裂边的操作都放在收缩边的操作之前,因为分裂边的累积形状改变值为零,所以边分裂操作并不改变网面的形状,也不改变网面的纹理.此外,由于完成分裂过程时,会有更多的边加到网面上,因此在通过收缩边来简化网面,并使网面顶点均匀分布时,可以为算法提供更多的选择.

4 算法实现

4.1 边排序

在简化网面的过程中,应尽量避免操作那些会带来很大形状改变和很大纹理改变的边。为此,应首先根据累积形状改变量 $S_A(e)$ 和累积纹理改变量 $T_A(e)$ 的大小对边进行排序,然后,对形状和纹理影响最小的边进行操作。为了保证顶点均匀分布或减小边长度的分布范围,必须优先操作那些边的长度与网面分辨率值相差最远的边,为此,给出如下边排序值计算公式

$$E = \left[\frac{S_A(e)}{S_{\max}} + 1 \right] \left[\frac{T_A(e)}{T_{\max}} + 1 \right] \left[\frac{l}{L} + 1 \right] \quad (7)$$

式中, l 是边长, L 是给定的网面分辨率。根据 E 值就可以构造网面边的优先操作队列,这样那些非常短、对形状改变影响较小,并且纹理改变影响较小的边会首先大批地删掉。经过多次迭代,网面上边长被迫趋向于一致。

由此可见,在网面简化过程中,边将不断从优先队列中删除或添加,如果下列条件之一满足:

- ① 长度 l 超过了给定分辨率 L ;
- ② 若边的累积形状改变误差超过了最大许可的累积形状改变误差 S_{\max} ;
- ③ 边的累积纹理改变误差超过了最大许可的累积纹理改变误差 T_{\max} 。

则该边不会加到优先队列中(因为所有长边的分裂工作已经结束,不会再发生分裂的情况)

这3个条件实际上构成了算法的终止条件,最终可以保证优先队列为空,当优先队列为空时,网面简化迭代过程就结束。

4.2 算法

设初始网面为 M_1 ,网面中的边为 e ,其边长为 l ,收缩边邻域 $N_c(e)$ 中的边为 e ,给定的网面分辨率为 L ,最大许可的累积形状改变量为 S_{\max} ,最大许可的累积纹理改变量为 T_{\max} ,则网面简化算法如下:

- (1) 对所有 $e \in M_1$ 且 $l > L$ 的边进行分裂,得到网面 M'_1 ;
- (2) 对所有 $e \in M'_1$ 的边,根据式(6)计算新顶点的位置 V 及其纹理值 t ,根据式(2)和式(3)计算形状改变误差和纹理改变误差;
- (3) 根据式(7)计算排序值,得到边操作优先队列;

(4) 取边操作优先队列中排序值最小的边 e 进行收缩。

(5) 对所有 $e_i \in N_c(e)$ 的边,计算其累积形状改变误差和累积纹理改变误差,若满足上节中的终止条件,则从优先操作队列中删除该边;否则,按式(7)重新计算其排序值,并更新其在边操作优先队列中的位置;

(6) 若优先队列非空,回到步骤(4);否则,简化结束。

4.3 实验结果

使用具有亮度纹理属性的三维网面和彩色纹理属性的三维网面分别对上述算法进行测试。表1、表2分别为对兵马俑、彩色地球进行简化所用参数及结果。

表1 算法对兵马俑进行简化所用参数及结果

模型(三角片数)	S_{\max}	T_{\max}	简化量(%)
原模型(36 816)	0	0	0
简化模型1(14 453)	0.1倍网面分辨率	5	61
简化模型2(3 697)	0.1倍网面分辨率	20	90

表2 算法对彩色地球进行简化所用参数及结果

模型(三角片数)	S_{\max}	T_{\max}	简化量(%)
原模型(73 728)	0	0	0
简化模型1(11 462)	0.1倍网面分辨率	4	84
简化模型2(5 682)	0.1倍网面分辨率	16	92

图3(a)所示的是兵马俑头像三维模型,该模型是用自制的立体视觉系统获取的稠密深度图序列,经过三维匹配技术处理后而得到的;图3(b)是通过本文简化算法得到的三角面和亮度信息减少约40%的兵马俑简化模型;图3(c)是经过简化算法得到的三角面和亮度信息量减少约90%的兵马俑简化模型;图3(d)是图3(c)的网格表示。图版1图1(a)为彩色地球仪三维图象,图版1图1(b)是经过本文简化算法得到的三角面和彩色信息量减少88%的彩色地球仪的简化模型;图版1图1(c)是经过简化算法得到的三角面和彩色信息量减少93%的彩色地球仪的简化模型;图版1图1(d)为图1(c)的网格表示。由上述简化图可见,经过本文所述的网面简化算法,不仅可以有效地简化模型数据,同时又能在给定的误差范围上保持模型的形状、灰度和彩色纹理特征。

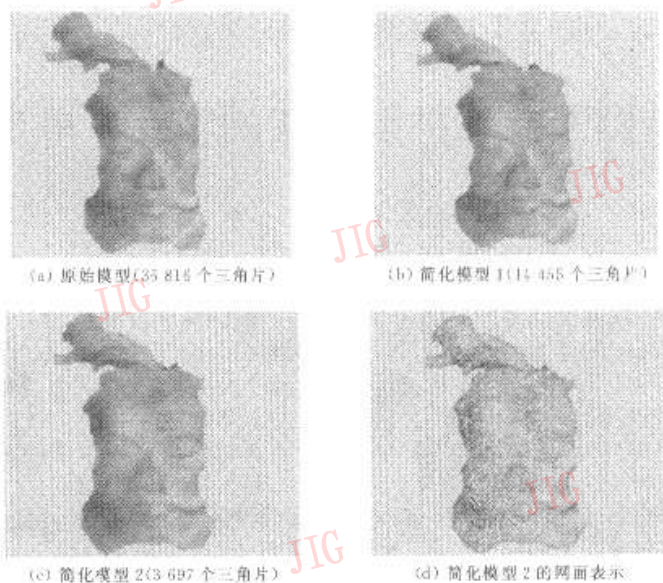


图 3 兵马俑简化模型图

5 结束语

本文通过边收缩和边分裂操作来有效地实现物体模型的网面简化,不仅保持了网面形状和拓扑关系,而且保持了网面的重要特征信息——亮度纹理或颜色纹理信息。该算法对有边界或无边界、任意弯曲的、多面的物体都能很好地进行简化处理。为了尽可能简化网面,本算法是在允许的误差范围内,来对纹理进行保持,其边收缩后新顶点位置的确定取决于纹理保持。本算法不仅可以用于大数据量的场景模型简化,以便实现实时的交互操作,而且可以用于计算机视觉领域基于三维模型的物体实时识别。

参考文献

- 1 Johnson A E, Hebert M. Control of polygonal mesh resolution for 3-D computer vision. *Graphical Models and Image Processing*, 1998, 60: 261~285.
- 2 Garland M, Heckbert P S. Simplifying surfaces with color and texture using quadric error metrics. In: *Proceedings of the IEEE Visualization Conference*, 1998; 263~269.
- 3 Cignoni P, Montani C, Rocchini C *et al.* General method for preserving attribute values on simplified meshes. In: *Proceedings of the IEEE Visualization Conference*, 1998; 53~66.
- 4 Cohen Jonathan, Olano Marc, Manocha Dinesh. Appearance-preserving simplification. In: *Proceedings of the ACM*

SIGGRAPH98^{*} Conference on Computer Graphics, Orlando, Florida, 1998; 19~24.



贾云得 1962年生,工学博士,现任北京理工大学计算机科学与工程系教授,博士生导师,主要研究方向为计算机视觉、图象分析与理解、人工生命和智能系统。



刘万春 1949年生,北京理工大学计算机科学与工程系副教授,主要研究方向为计算机视觉,图象处理和并行计算。



裴明涛 1977年生,北京理工大学计算机科学与工程系博士生,研究方向为计算机视觉,主要进行三维物体的建模、简化以及识别方面的工作。



朱玉文 1950年生,北京理工大学计算机科学与工程系副教授,主要研究方向为模式识别以及图象处理。