

基于曲面基本型的网格平滑与特征增强方法

李治隆, 苏志勋, 王 辉, 毕海川

(大连理工大学数学科学学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 曲面基本型描述了网格曲面的局部微分特征, 针对该特征进行处理, 提出一种网格平滑与特征增强方法。通过修改曲面离散基本型以平滑与增强网格特征, 在约束最小二乘意义下通过重建曲面得到新网格, 并结合稀疏矩阵线性系统求解器进行实时响应处理。实验结果表明, 该方法简单高效, 具有较好的降噪效果, 可在一定程度上防止体积收缩与形状畸变。

关键词: 曲面基本型; 网格特征; 网格平滑; 特征增强; 网格降噪

Mesh Smoothing and Feature Enhancement Method Based on Surface Fundamental Form

LI Zhi-long, SU Zhi-xun, WANG Hui, BI Hai-chuan

(School of Mathematical Sciences, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

【Abstract】 Surface fundamental form describes the local differential features of mesh surface. This paper presents a mesh smoothing and feature enhancement method aiming to deal with these features. This method smoothes and enhances mesh features by modifying the discrete forms of mesh surface. The new mesh is reconstructed in the least square sense with proper constraints added. With the help of fast linear system solver for sparse matrix, the method can achieve real-time processing effect. Experimental results demonstrate that this method is simple and effective. Meanwhile, it has good denoising effect, and can prevent volume contraction and shape distortion to some extent.

【Key words】 surface fundamental form; mesh feature; mesh smoothing; feature enhancement; mesh denoising

1 概述

随着现代 3D 数字采集技术的高速发展, 越来越多的三角网格数据被应用到商业与研究领域中。由于采集过程易受到硬件设备、环境等因素的影响, 通常所采集到的网格模型不可避免地存在各种噪声, 即便使用高精度的扫描设备也无法克服该问题。因此, 需要对原始采集数据进行预处理得到普适性更好的网格数据。在实际应用中, 一般采用网格平滑与特征增强等方法来达到这种目的, 这类方法面临的一个重要的共性问题是在网格处理过程中需要准确描述特征并对其进行适度的调整控制。

网格特征在图形处理领域中具有重要意义, 它与网格变化相关的所有领域都密不可分, 如何给出满足实际需求的网格特征定义仍然是应用中的难点。传统方法借助微分方程、多尺度分析等理论描述网格特征, 通常模型较为复杂、计算量大、运行速度慢。近年来, 用微分表达式刻画网格局部特征的方法由于具有速度快、鲁棒性好、易于实现等优点而受到广泛关注。这类特征定义被越来越多地应用到网格变形、形状逼近、数据压缩等领域^[1-2]。

网格平滑主要包括各向同性、各向异性以及混合型 3 类方法^[3]。各向同性的方法没有对曲面特征进行区别处理, 虽然在一定约束条件下能克服体积收缩问题, 但是对于曲面特征保持不好, 通常会带来形状畸变。各向异性的方法种类繁多, 由于加入了特征相关的分类处理, 可以防止形状畸变的产生, 但是该方法的计算开销大且参数众多。混合型的方法一般以整合多种方法的优势部分来解决问题, 因此这类方法相对更鲁棒, 不过具体实现比较复杂。

特征增强包括在网格降噪过程中对网格主要特征进行相对的保护性增强和在网格造型时对网格细节特征进行突显性增强^[4]。对于特征与强噪声很接近的网格, 保护性增强难度较大, 通常需要进行额外的预处理才能达到满意的效果, 此时相应方法流程比较繁琐。凸显性增强能够将网格的细节特征加以突出放大, 为曲面造型与显示带来方便。增强过程中需要注意在主体与细节特征之间进行平衡, 过度增强会造成效果失真。

本文从上述分析出发, 将描述曲面局部性质的微分表达式视为定义于网格上的特征信号, 通过处理这种网格信号实现实时网格平滑和增强。

2 基于曲面基本型特征的网格平滑

文献[2]从经典微分几何理论出发, 给出网格上的离散基本型、离散标架定义并将其应用于网格变形和形状插值中。该方法使用了刚体运动不变的微分表达式, 能够满足保持网格局部特征的实时编辑、造型需求。

2.1 曲面离散基本型

令 $M = (G, P)$ 为一个二维流形三角网格, $G = (V, E, F)$ 为

基金项目: 国家自然科学基金-广东联合基金资助项目(U0935004); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET-05- 0275); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目

作者简介: 李治隆(1981 -), 男, 博士研究生, 主研方向: 图形图像处理; 苏志勋, 教授、博士、博士生导师; 王 辉、毕海川, 硕士研究生

收稿日期: 2010-04-27 **E-mail:** zhilongli@gmail.com

M 上的拓扑图,其中, V 、 E 、 F 分别为顶点、边和面的集合; P 为与 V 中各顶点相关联的几何; n 为 V 中顶点个数; m 为 F 中面个数。记第 i 个顶点为 v_i , 该顶点处切平面为 $T_i M$, 法向量为 N_i 。由 v_i 出发连向它一环邻域的向量记为 $e_i^1, e_i^2, \dots, e_i^{d_i}$, \tilde{e}_i^k 表示 e_i^k 在 $T_i M$ 上的投影(见图 1)。

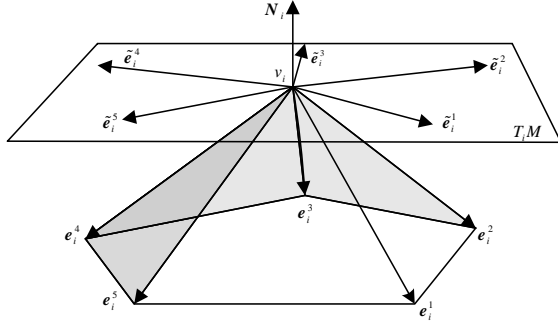


图 1 曲面局部一环结构

定义第 1 离散基本型为:

$$I_i(\mu) := \langle \mu, \mu \rangle_{R^3} = \langle \mu_1 \tilde{e}_i^k + \mu_2 \tilde{e}_i^{k+1}, \mu_1 \tilde{e}_i^k + \mu_2 \tilde{e}_i^{k+1} \rangle_{R^3} = \mu_1^2 \tilde{g}_i^{k,k} + 2\mu_1 \mu_2 \tilde{g}_i^{k,k+1} + \mu_2^2 \tilde{g}_i^{k+1,k+1}$$

其中, $\mu = \mu_1 \tilde{e}_i^k + \mu_2 \tilde{e}_i^{k+1}$ 为 $T_i M$ 中的向量; $\tilde{g}_i^{k,k} = \langle \tilde{e}_i^k, \tilde{e}_i^k \rangle_{R^3}$ 和 $\tilde{g}_i^{k,k+1} = \langle \tilde{e}_i^k, \tilde{e}_i^{k+1} \rangle_{R^3}$ 为第 1 离散基本型系数。定义第 2 离散基本型为:

$$II_i(\mu) := \mu_1 \langle e_i^k, N_i \rangle_{R^3} + \mu_2 \langle e_i^{k+1}, N_i \rangle_{R^3} = \mu_1 \tilde{L}_i^k + \mu_2 \tilde{L}_i^{k+1}$$

其中, $\tilde{L}_i^k = \langle e_i^k, N_i \rangle_{R^3}$ 为第 2 基本型系数。

由定义可知, 第 1 离散基本型是由投影边的长度和它们之间的有向角决定的, 而第 2 基本型记录了各顶点一环邻域的法向投影高度。网格顶点处的离散基本型描述了其一环邻域的几何, 是一种有效的曲面局部逼近方法。

2.2 曲面离散标架

定义顶点 v_i 处的离散标架为 (b_i^1, b_i^2, N_i) , 其中, $b_i^1 \in T_i M$ 为平行于 \tilde{e}_i^1 的单位向量; $b_i^2 \in T_i M$ 为正交于 b_i^1 的单位向量, 使得 (b_i^1, b_i^2, N_i) 构成右手系正交基。这里 \tilde{e}_i^1 是任意选定的。由离散标架及该点处离散基本型可以在刚体变换下唯一确定该点一环邻域各顶点的位置。

2.3 网格平滑与网格增强方法

由于曲面的离散基本型反映了网格的局部性质, 能够完全制约网格的局部特征, 因此可以将其视作定义于网格上的特征信号, 对这种信号进行的平滑与增强处理将体现在网格特征上, 从而能够得到质量更好的网格数据。本文方法的具体实现步骤如下:

步骤 1 输入原网格。将原网格输入并计算各顶点 v_i 处的离散标架 (b_i^1, b_i^2, N_i) 。

步骤 2 计算原网格特征。计算各顶点 v_i 处的离散基本型系数。由定义可知, 若顶点 v_i 处的一环邻域有 d_i 个点, 则需要计算 $2d_i$ 个第 1 离散基本型系数和 d_i 个第 2 离散基本型系数, 共计 $3d_i$ 个标量系数。

步骤 3 平滑与增强。将第 2 离散基本型系数 \tilde{L}_i^k 作为特征信号进行平滑或增强得到新的第 2 离散基本型系数:

$$\hat{L}_i^k = f_{s,e}(\tilde{L}_i^k)$$

其中, $f_{s,e}$ 为特征控制核函数, 负责控制对特征进行平滑与增强的程度。

本文使用线性函数 $f_{s,e}(\tilde{L}_i^k) := w_{s,e} |\tilde{L}_i^k| + c_c$ 进行特征控制, 其中, $w_{s,e}$ 为特征平滑与增强权; c_c 为补偿量。

步骤 4 重建新网格。由离散基本型及离散标架定义得关系式:

$$e_i^j = v_j - v_i = \tilde{e}_i^k + \tilde{L}_i^k N_i = \langle \tilde{e}_i^k, b_i^1 \rangle b_i^1 + \langle \tilde{e}_i^k, b_i^2 \rangle b_i^2 + \tilde{L}_i^k N_i \quad (1)$$

其中, $\forall (i, j) \in E$; j 是 v_i 的第 k 个邻点。

设重建后新网格为 $M' = (G', P')$ 、 $G' = (V', E, F)$ 为 M' 上的拓扑图, 记第 i 个顶点为 v_i' , 即新网格与原网格有相同的拓扑和不同的几何。具备新特征的网格应使能量:

$$Energy(M') = \sum_i \sum_{(i,j) \in E} \|(v_j' - v_i') - (\tilde{e}_i^k + \tilde{L}_i^k N_i)\|^2$$

达到极小。为减少体积收缩, 在对该能量极小化时以原网格各面重心位置作为软约束。这个极小化过程等价于在最小二乘意义下求解线性方程组:

$$\begin{pmatrix} L & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}T \end{pmatrix} V' = \begin{pmatrix} \Phi \\ \frac{1}{3}TV \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中:

T 为由网格面结构 F 决定的 $m \times n$ 矩阵:

$$T_{pq} = \begin{cases} 1, & q \in f_p, f_p = (r, s, t) \in F, 1 \leq p \leq m, 1 \leq q \leq n \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

L 为 $2l \times n$ 矩阵, 它的第 $\sum_{s=1}^i d_s - d_i + 1$ 至第 $\sum_{s=1}^i d_s$ 行(对应于 v_i 的一环边)为:

$$L_{\left(\sum_{s=1}^i d_s - d_i + k\right)j} = \begin{cases} -1 & j = i \\ 1 & v_j \text{ 是 } v_i \text{ 的第 } k \text{ 个邻点}, k \in [1, d_i] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

Φ 为 $2l \times 1$ 维列向量, Φ 中第 $\sum_{s=1}^i d_s - d_i + 1$ 至第 $\sum_{s=1}^i d_s$ 行元素(对应于 v_i 的一环边)为:

$$\Phi_{\sum_{s=1}^i d_s - d_i + k} = \langle \tilde{e}_i^k, b_i^1 \rangle b_i^1 + \langle \tilde{e}_i^k, b_i^2 \rangle b_i^2 + \tilde{L}_i^k N_i, k \in [1, d_i]$$

它体现了处理后 v_i 处一环邻域的局部性质。最小二乘方法可以令约束误差均匀分布到整个网格, 得到更好的整体重建效果。重建后得到的新网格 M' , 即为特征平滑与增强后的新网格。

步骤 5 迭代。重复步骤 1~步骤 4 直至网格特征达到使用需求, 通常 2 次~10 次迭代即可得到满意效果。

3 实验结果

本文算法实验在 PC 上完成, 配置参数为 1.6 GHz Intel Celeron CPU、1.0 GB RAM, 开发工具为 VC++2005。由于式(2)的左侧系数矩阵在迭代过程中始终不变, 因此可先对其进行 Cholesky 分解, 然后在逐次迭代中更新式(2)的右端项并通过回代快速求解, 从而进行实时网格平滑与增强。这个求解过程可以使用稀疏矩阵线性系统求解器如 TAUCS、CHOLMOD 等来实现。

图 2 给出了使用本文方法进行处理后得到的效果。相对于图 2(a), 图 2(b)中的结果保持了恐龙的主体躯干不变并将细节特征进行了平滑; 图 2(c)中的结果则增强了肋骨、关节等细节, 使得恐龙的骨骼特征更加突出。



图2 本文方法网格处理效果

在本文实验中,线性特征控制核函数的参数取值为:特征平滑时, $w_{s,e} = 1e^{-5}, c_c = 1e^{-5}$; 特征增强时 $w_{s,e} = 2.5, c_c = 1e^{-5}$ 。式(1)中重心位置约束权取值为 $w_i = 1e^{-4}, i = 1, 2, \dots, n$ 。

图3展示了使用本文方法进行降噪的效果。图3(b)中对图3(a)Skull模型添加了高斯噪声(噪声方差为网格平均边长的10%),此时噪声与原网格中的部分细节特征变得很相近且难以区分。图3(c)使用本文方法对含噪声网格进行了2次迭代降噪,可以看到网格的高斯噪声得到了有效去除。同时,网格的重要特征如上方的文字、蛇纹图及下方的牙齿等都得到了有效保持。



图3 本文方法的降噪效果

本文方法可以在一定程度上防止网格的体积收缩和形状畸变,使网格的处理更符合造型需求。图4分别使用图4(b)Laplacian方法和图4(c)本文方法对Armadillo模型进行了100次迭代平滑处理,其中,Laplacian方法的迭代步长为1.0。Laplacian方法造成了严重的体积收缩,平滑后的网格体积只有原网格的60.33%。使用本文方法平滑后的网格体积为原网格的93.59%。除了平滑方法不可避免会带来固有的体积收缩,本文方法所造成的额外收缩量很小,因此可以在网格处理中更好地保持网格的整体性质。进一步可以将平滑与增强后的网格与原网格进行逐点体积对比,用得到的放缩系数调整当前网格各点处的离散标架并再次重建网格,从而得到与原网格体积更接近的结果^[5]。由于计算曲面局部体积比较耗时,本文没有在逐步迭代中反复进行体积调整而只针对最后结果进行了一次体积调整。图4(d)通过这种调整得到的网格体积为原网格的98.52%。

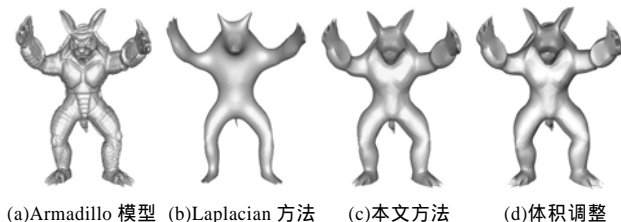


图4 本文方法防止体积收缩和形状畸变的效果

图5使用图5(b)High-boost方法^[4]与图5(c)本文方法对龙模型进行增强处理,其中,High-boost方法中提升阈值为1.5、迭代步长为0.5。从结果看,2种方法增强效果相同,但是在处理速度上本文方法具有明显优势。

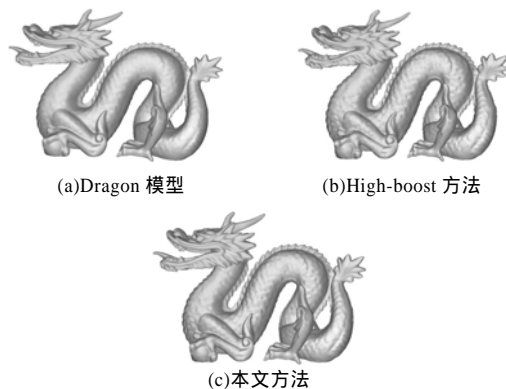


图5 本文方法与High-boost方法增强效果对比

表1列出了图2~图5中相关模型的网格信息和处理时间,处理时间记录的是各方法的单次迭代时间。从数值结果看,单次迭代速度Laplacian方法最快、本文方法次之、High-boost方法最慢。但在实际应用中,用户经常需要对网格进行反复处理才能得到所需效果。本文方法只在首次分解时使用时间较多,在其后的操作过程中回代求解时间很短,因此节省了总体的时间开销,更适合实时的网格处理操作。

表1 本文所用各模型网格信息及处理时间

模型	网格信息/个		子图	处理时间/s	
	顶点	面		分解	回代
图2(a)	2 253	4 502	图2(b)、图2(c)	0.125 0	0.015 0
图3(a)	20 002	40 000	图3(c)	1.344 0	0.063 0
图4(a)	30 272	60 540	图4(b)	0.965 7	
			图4(c)	1.828 0	0.109 0
图5(a)	50 000	100 000	图5(b)	98.265 0	
			图5(c)	3.516 0	0.203 0

4 结束语

本文基于曲面基本型描述网格特征,给出网格处理方法,以及具体的实现策略。本文方法简单、高效、鲁棒性好,能够有效地对网格曲面的特征进行平滑与增强,并可在一定程度上避免形状畸变,实验证明该方法能够达到较好的实时处理效果。另外,本文只针对线性的特征控制核函数展开相关实验,下一步工作为:进一步研究构造能自适应选参的非线性特征控制核函数。

参考文献

- [1] Botsch M, Sorkine O. On Linear Variational Surface Deformation Methods[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(1): 213-230.
- [2] Lipman Y, Sorkine O, Levin D, et al. Linear Rotation-invariant Coordinates for Meshes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 479-487.
- [3] Su Zhixun, Wang Hui, Cao Junjie. Mesh Denoising Based on Differential Coordinates[C]//Proc. of IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications. Beijing, China: IEEE Press, 2009.
- [4] Yagou H, Belyaevy A, Weiz D. High-boost Mesh Filtering for 3D Shape Enhancement[J]. Journal of Three Dimensional Images, 2003, 17(1): 170-175.
- [5] Lipman Y, Cohen O D, Gal R, et al. Volume and Shape Preservation via Moving Frame Manipulation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(5): 1-14.

编辑 陆燕菲