

一种基于带噪声的三角网格模型的光顺算法*

赵 晔¹, 翟世梅²

(1. 西安工业大学 理学院, 西安 710032; 2. 西安高科技研究所, 西安 710025)

摘要: 为了去除三角网格模型中的噪声,提出了一种基于均值漂移的特征保持的网格光顺算法。该方法在对模型中的三角形的法向量进行滤波的基础上鲁棒地计算了顶点的法向量,利用均值漂移方法自适应地聚类出顶点的邻域。结合顶点间几何特征的相似性,将改进后的双边滤波算子应用于顶点的位置更新,从而完成模型的光顺。实验结果证明了网格光顺算法的有效性。利用这种网格算法,可以达到光顺带噪声的三角网格模型的目的,并在光顺的同时,有效地保持了模型中原有的特征。

关键词: 均值漂移; 光顺; 双边滤波算子; 三角网格

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)09-3309-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.029

Smoothing algorithm based on triangle mesh with noise

ZHAO Ye, ZHAI Shi-mei

(1. School of Science, Xi'an University of Technological, Xi'an 710032, China; 2. Xi'an High-Tech Research Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to filter the noise in triangular mesh model, this paper presented a feature preserving mesh smoothing algorithm based on mean shift. First, it computed the normal of the vertex robustly according to the filtered normal of triangles. Then, it used the mean shift approach to acquire the neighborhood of the vertex adaptively. Finally, it improved the bilateral filter to incorporate geometric feature similarity of the vertex and the model was smoothed after updating the position of the vertex. The experiment results show that algorithm is effective. The use of this grid algorithm can smooth triangular mesh model with noise and keep some original characteristics of the model.

Key words: mean shift; smoothing; bilateral filtering operator; triangular mesh

0 引言

三角网格模型通常是由三维测量设备获得的散乱点集重建而成。随着三维测量技术的不断发展,人们很容易把现实世界中的物体数字化成三角网格模型。尽管三维测量的精度不断提高,但由于人为的扰动、测量环境、测量设备固有的误差等因素的影响,测量获得的三角网格模型中不可避免地带有噪声。噪声的存在不仅降低了模型的质量,而且不利于测量模型的原始设计意图的理解和后续的几何处理。因此,必须对测量模型进行光顺处理,以消除噪声,同时尽可能地保持模型固有的几何特征,并且使模型的体积变化最小。

网格光顺是计算机图形学、逆向工程、有限元建模和数据可视化等领域中的一个常见问题。目前最流行的几种光顺算法包括拉普拉斯光顺算法^[1]、平均曲率流算法^[2]、各向异性散播算法^[3,4]和双边滤波算法^[5-7]。拉普拉斯光顺是最简单、应用最广泛的光顺算法,它对所有噪声使用统一的流形,在空间和时间上具有线性复杂度,但需要较多的迭代次数,由于无差别地对待特征和噪声,因此不仅不能保持特征,还会引起体积收缩。平均曲率流算法使顶点沿着其法向量的方向以平均曲率的速度移动,以获得光顺的曲面效果,但该算法会破坏原有的

网络连接,从而产生新的缺陷。各向异性散播算法将图像中的各向异性去噪思想运用到三角网格模型上,获得了较好的特征保持效果,但算法复杂度高且对模型体积保持的效果较差。与各向异性散播算法所不同的是,双边滤波算法是邻域顶点的加权平均,这里的权值不仅与顶点间的空间位置有关,而且还与顶点之间某种相似性有关。该类算法能较快地去除噪声,并且由于在光顺过程中加入了相似性的概念,因此模型上的特征可以有效地保持。但 Jones 并非是沿着法线方向来调整顶点位置的,因此会使得光顺后的顶点在其切线方向有明显的移动,出现顶点漂移的情况^[5]。Fleishman 对模型中每个顶点通过在其法向上的迭代来调整该点的位置^[6],所以其光顺效果要优于 Jones 的方法,但该方法在光顺稍大的噪声时会引起过光顺,因而不能有效地保持模型的细小特征。Schall 延续了双边滤波的思想,指出顶点之间的相似性度量对光顺结果和特征保持都具有重要意义^[7]。在此基础上,本文提出了非局部的、特征保持网格光顺算法。这种算法相似性的度量是顶点间的邻域,因此算法更加鲁棒,特征保持效果更好,但邻域相似性计算耗时较多。

鉴于顶点的邻域和顶点间的相似性在双边滤波算法中的作用,本文在双边滤波算法的基础上,设计了一种基于均值漂

收稿日期: 2012-02-17; **修回日期:** 2012-03-20 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11171271,11001217);陕西省自然科学基金资助项目(2009JM1017)

作者简介: 赵晔(1977-),女,山东潍坊人,讲师,博士,主要研究方向为模糊数学(yezi0292@163.com);翟世梅(1978-),女,讲师,硕士,主要研究方向为导弹模拟与仿真。

移聚类的顶点邻域自适应确定的方法和一种新的、快速的顶点之间的相似性度量来对三角网格模型进行光滑。首先鲁棒地计算顶点的法矢量,然后利用均值漂移算法自适应确定顶点的邻域并计算顶点之间的相似性,最后利用双边滤波完成了网格模型的光滑。由于充分考虑顶点的邻域信息及其相似性计算,本文在取得光滑网格模型的同时,能有效地保持模型的特征。

1 网格光滑算法

1.1 顶点法向量的计算

网格光滑算法中,新顶点的位置通常都是通过原始顶点沿着法向量方向移动一定距离而获得,且法向量也是顶点间相似性的一个重要体现。因此,顶点法向量的计算是否鲁棒直接决定了网格光滑的结果。在噪声网格模型中,顶点位置并不是真实的位置,因此其构成的三角形的法矢量也含有噪声,不能正确反映真实三角网格模型中三角形的朝向。因此本文首先对三角形的法矢量进行优化,使其尽可能地反映模型的真实情况,然后在此基础上计算顶点的法向量。

本文利用 Yagou 的三角形法矢光滑技术来过滤网格模型中每个三角形的法矢量^[8]。该方法中,与当前待光滑的三角形 T 的三条边直接连接的三角形,在进行面积加权平均的时候赋权值为 2,而与其三个顶点连接的三角形则赋权值为 1,如图 1 所示。

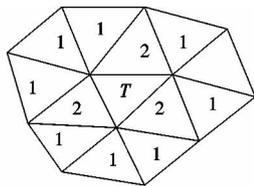


图1 三角形 T 的邻接三角形集合 N_T 中每个三角形的权值分配

光滑后的法矢量计算如下:

$$n' = \frac{1}{2 \sum_{T_i \in N_e} A(T_i) + \sum_{T_j \in N_v} A(T_j)} (2 \sum_{T_i \in N_e} A(T_i) n_i + \sum_{T_j \in N_v} A(T_j) n_j) \quad (1)$$

其中: $A(\cdot)$ 表示三角形的面积。经过上述处理后,法矢量能逼近真实的原始网格三角形的法矢量,同时,模型中的特征也被有效地保留。

模型中,任意顶点 v 的法矢是与其直接连接的三角形以其面积作为权值的加权平均。利用上述光滑后三角形的法矢,顶点 v 的法矢量 n_v 计算如下:

$$n_v = \frac{1}{\sum_{T \in N_T} A(T)} \sum_{T \in N_T} A(T) n_T \quad (2)$$

1.2 自适应确定顶点的邻域

对顶点进行光滑处理时,需要利用其邻域的几何信息。邻域的选取在某些情况下,将直接影响到光滑的效果。根据已有的网格光滑算法,顶点的邻域通常都是以其为中心,取距其一定距离范围内的点作为其邻域,因此邻域的大小需要事先根据网格的分布人为经验地确定。本文利用三角网格模型良好的拓扑连接关系,找到与顶点的二阶邻接顶点集合(二阶邻接顶点是指与该顶点直接连接的顶点集合与该集合中所有顶点直接连接的顶点集合的并集)。然后利用均值漂移聚类技术聚类出该集合中与该顶点几何属性相似的顶点集合作为其邻域。

设 x_i 是顶点 v 的二阶邻接顶点集合 C 中任意顶点的特征向量(即顶点的坐标和法矢量组成的六维向量)。 x_i 的二阶邻接顶点集合为: $C(x_i) = \{q_{i,1}, q_{i,2}, \dots, q_{i,k}\}$ 。其均值漂移向量计算如下:

$$M_v(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^k g(\|x_i^r - q_{ij}^r\|)(q_{ij} - M(x_i))}{\sum_{j=1}^k g(\|x_i^r - q_{ij}^r\|)} \quad (3)$$

其中: $g(\cdot)$ 为高斯核函数; x_i^r 为顶点的特征信息部分,即顶点的法向量; $M(x_i)$ 为 x_i 的均值漂移点,软件实现中, $M(x_i)$ 的初始值即为 x_i 。于是顶点的均值漂移过程即为顶点到其均值漂移点的累进移动过程:

$$M(x_i) += M_v(x_i) \quad (4)$$

从式(4)可以看出,均值漂移过程是一个迭代的过程,它从顶点沿着其最大密度的梯度方向移动,并同时考虑欧式空间域和特征空间域。文献[9]证明了其收敛性,并指出该迭代过程可以扩展到任意维数的数据。通过该过程,每个顶点都将收敛为一个稳定的点,称为局部模式点。寻找到顶点及其二阶顶点集合中每个点的局部模式点后,就可自适应地聚类出顶点 v 的邻域。选择与顶点 v 的局部模式点距离在一定阈值范围内的点作为其邻域,参与该顶点的光滑计算。这样,顶点的邻域即是与其几何相似的局部区域。

1.3 顶点间相似性的计算

设顶点 p 是顶点 v 邻域内的任意一点。 C_p 为顶点 p 的一阶邻接顶点集合, p_i 是其中任意顶点; C_v 为顶点 v 的一阶邻接顶点集合, q_i 是其中任意顶点,则顶点 p 与 v 的相似性计算如下:

$$\varphi_s(v, p) = e^{(\text{similar}(v, p)/s)^2} \quad (5)$$

其中:

$$\text{similar}(v, p) = \frac{|(p_{\text{centroid}} - q_{\text{centroid}})n_v|^2}{2} + (1 - \lambda)$$

$$p_{\text{centroid}} = \frac{1}{|C_p|} \sum_{i=1}^{|C_p|} p_i$$

$$q_{\text{centroid}} = \frac{1}{|C_v|} \sum_{i=1}^{|C_v|} q_i$$

$$\lambda = \min(\text{area}(v), \text{area}(p)) / \max(\text{area}(v), \text{area}(p))$$

其中: $\text{area}(v)$ 表示与顶点 v 直接连接的所有三角形的面积和。本文顶点间的相似性计算不仅考虑了顶点的局部几何信息,还融合了顶点的分布密度信息,因此相似性的计算更加鲁棒和有效。利用重心点来代表顶点的局部几何信息,显著地提高了计算效率。

1.4 双边滤波

在上述基础上,本文提出了改进的双边滤波算法流程。双边滤波的网格光滑是一种各向异性的网格光滑算法,具有简单、有效、快速的特点。利用顶点与其邻域顶点之间的欧式距离和上述的相似性信息,得到双边滤波器光滑公式如下:

$$v_{\text{new}} = v + tn \quad (6)$$

其中:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^{|N_v|} w_c(\|v - v_i\|) \varphi_s(v, v_i) (n(v - v_i))}{\sum_{i=1}^{|N_v|} w_c(\|v - v_i\|) \varphi_s(v, v_i)}$$

$$w_c = \exp(-x^2/\sigma_c^2)$$

其中: σ_c, s 是需要用户设定的光顺参数,可以参考文献[6~9]设定其大小; $N_v = \{v_i, i = 1, 2, \dots\}$ 是顶点 v 经过均值漂移聚类得到的自适应的邻域。

2 实验结果

在 VS2008 下实现了本文算法,在主频 1.8 GHz,内存 512 MB 的 PC 机上运行程序。为了验证本文算法的有效性,与 Fleishman 的双边滤波算法在光顺效果和体积保持上进行了比较,如图 2、3 所示。图 2(a)为含噪声的 hand 模型,(b)为 Fleishman 算法三次迭代的光顺结果,(c)为本文算法迭代一次的光顺结果。图 3(a)为含噪声的 woman 模型,(b)为 Fleishman 算法三次迭代的光顺结果,(c)为本文算法迭代一次的光顺结果。图中的结果表明,本文算法的光顺效果优于 Fleishman 算法,能有效去除模型中含有的噪声。为了证明本文算法对模型体积和整体形状特征保持的能力,给出了原始模型及其光顺结果的空间最小包围盒信息,如表 1 所示。实验的结果表明,本文算法能使模型的体积变化较小,并且具有较强的模型整体形状保持能力。

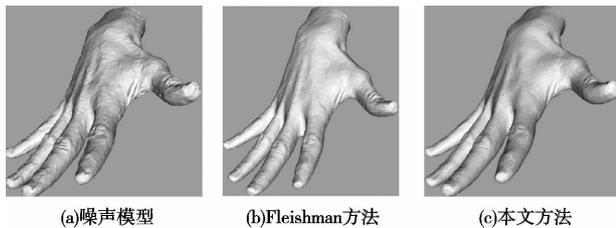


图2 人手模型光顺

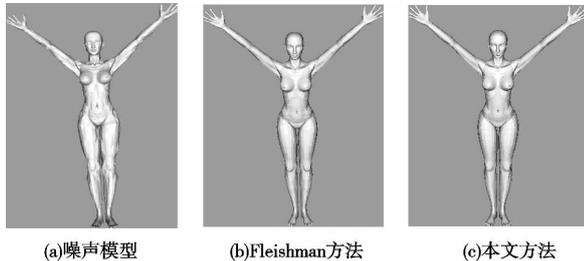


图3 woman模型光顺

表 1 噪声模型和光顺模型的体积比较

(a) 人手模型的体积(面片数量 1000 个)

空间包围盒	原始模型	Fleishman 光顺	本文光顺
长/mm	51.571	50.096	51.524
宽/mm	223.775	222.366	223.509
高/mm	160.698	159.559	160.382
体积/mm ³	1 854 517.550	1 777 430.957	1 846 982.857

(b) woman 模型的体积(面片数量 24788 个)

空间包围盒	原始模型	Fleishman 光顺	本文光顺
长/mm	720.536	720.406	720.013
宽/mm	157.243	153.889	156.042
高/mm	949.906	949.471	948.973
体积/mm ³	107 623 570.607	105 260 659.876	106 619 090.262

3 结束语

本文根据顶点法向量鲁棒的计算结果,通过均值漂移聚类自适应地确定了顶点邻域并提出一种有效的顶点间的相似性度量。在此基础上,利用双边滤波来获得顶点的真实坐标,达到光顺带噪声的三角网格模型的目的,并在光顺的同时,有效地保持了模型中原有的特征。实验结果证明了本文算法的有效性。在今后的工作中,将进一步研究更好的顶点间相似性度量,以进一步提高双边滤波的光顺效果。

参考文献:

- [1] VOLLMER G, MENCL R, MULLER H. Improved Laplacian smoothing of noisy surface meshes [J]. *Computer Graphics Forum*, 1999, 18(3): 131-138.
- [2] CLARETZ U, DIEWALD U, RUMPF M. Anisotropic geometric diffusion in surface processing[C]//Proc of Conference on Visualization. Washington DC: IEEE Computer Society, 2000: 397-405.
- [3] BAJAJ C L, XU G. Anisotropic diffusion on surface and function on surfaces [J]. *ACM Trans on Graphics*, 2003, 22(1): 4-32.
- [4] FLEISHMAN S, DRORI I, COHENOR D. Bilateral mesh denoising [C]//Proc of ACM SIGGRAPH. New York: ACM, 2003: 950-953.
- [5] SCHALL O, BELYAEV A, SEIDEL H P. Adaptive feature-preserving non-local denoising of static and time-varying range data [J]. *Computer-Aided Design*, 2008, 40(6): 701-707.
- [6] YAGOU H, OHTAKE Y, BELYAEV A. Mesh smoothing via mean and median filtering applied to face normals [C]//Proc of Geometric Modeling and Processing. 2002: 124-131.
- [7] YAMAUCHI H, LEE S, LEE Y, et al. Feature sensitive mesh segmentation with mean shift [C]//Proc of International Conference on Shape Modeling and Application. 2005: 236-243.
- [8] 徐艳蕾, 赵继印, 焦玉斌, 等. 噪声图像边缘检测方法的研究 [J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(1): 387-389.
- [9] 鲁均云, 李星毅, 施化吉, 等. 基于内码序值聚类的相似重复记录检测方法 [J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(3): 874-878.