

散乱点云的补偿滤波

梁新合^{1,2}, 梁晋¹, 郭成¹, 曹巨名³, 王永信¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 河南科技大学材料科学与工程学院, 471004, 河南洛阳;
3. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对散乱点云的滤波问题, 提出了一种体积保持的滤波方法. 由于采用双边滤波器对散乱点云模型多次迭代滤波时, 在高曲率区域会产生较大的形状变形, 因此提出一种新的补偿量滤波算子, 对滤波移动量进行平滑处理, 获得形状补偿量, 并依据形状补偿量将降噪点位置向原始位置方向调整, 从而减少了滤波产生的形状变形. 实验表明, 该方法具有减小体积收缩的能力, 对于噪声点云模型滤波, 该方法简单、有效, 与传统的双边滤波相比, 能够减少滤波中的变形, 获得具有更多细节特征点模型.

关键词: 散乱点云; 双边滤波; 体积保持

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)11-0091-04

Scatter Point Cloud Compensation Filtering

LIANG Xinhe^{1,2}, LIANG Jin¹, GUO Cheng¹, CAO Juming³, WANG Yongxin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471004, China;
3. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For fairing complex noisy point cloud model, a method preserving geometric features and volumes is proposed. When a complex scatter point model is smoothed iteratively by bilateral filter, more distortions appear in high curvature areas, and a new compensation filter is considered to smooth displacements of bilateral filtering to achieve compensation distances. The final results is obtained by adjusting smoothed points back to its previous position with the compensation distance. Compared with bilateral filtering, the new method is able to preserve more fine features and decrease shape shrinkage obviously in a series of numeric experiments.

Keywords: point cloud filtering; bilateral filtering; volume preservation

在测量过程中, 由于受到环境以及电噪声等因素的影响, 用光学扫描仪获得的密集点云不可避免地存在着噪声, 因此当采用传统方法滤波时, 往往会导致离散模型的细微特征模糊和体积收缩.

针对保持体积的滤波方法主要有频域滤波方法、投影滤波方法、曲率流^[1]滤波方法等, Taubin^[2-3]提出利用一次和二次 Laplacian 算子来分别放大低频信息和补充体积收缩. 但是, 该方法严重地依赖于对恒量系数的选择, 而不良的恒量系数选择有时会导

致不稳定的结果. Alexa 等人^[4-5]提出了投影的滤波方法, 在局部参数化的基础上, 构造移动最小二乘 (MLS) 曲面逼近局部邻域形状, 通过将取样点投影到二次曲面上的方法来降噪. 该方法在滤波过程中能够保持体积, 但需求解二次曲面的非线性最优化问题, 同时也会造成细微特征、尖锐特征的模糊. 刘胜兰等人^[6]在主曲率平滑的基础上, 提出了网格模型滤波方法, 根据均化后的主曲率与原曲率的差值来确定顶点的新位置. 刘新国等人^[7]提出采用重心

收稿日期: 2011-03-11. 作者简介: 梁新合(1966—), 男, 博士生; 郭成(联系人), 男, 教授. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975219); 苏州市应用基础研究计划资助项目(SYG201014).

网络出版时间: 2011-08-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110820.1055.002.html>

约束的网格面滤波,通过控制局部邻域的体积而避免整个模型的体积收缩.肖春霞等人^[8]提出的动态平衡曲率流滤波方法,是通过在曲率流中加入强制项来保持点模型的体积不变.陈仁杰等人^[9]将网格面光顺问题转化为带有一组非线性约束的二次优化问题,提出用原始顶点约束的体积来保持滤波算法.然而,这些方法实质上都是各向同性的滤波方法,都难以避免细微特征的损失.

针对点云滤波,本文提出一种补偿滤波的算法,其主要思想是对滤波移动量光顺,并将光顺后的结果作为补偿量,将降噪点向原始位置方向调整,以补偿双边滤波中的特征损失,从而获得体积及特征保持的模型.

1 散乱点云的补偿滤波

1.1 双边滤波

双边滤波是一种常用的图像滤波方法,具有特征保持的特点,Fleishman 等人^[10]将其推广到网格面模型的滤波中,由于该滤波方法只与滤波点的邻域有关,不涉及网格面的结构信息,因此可以直接推广到点模型的滤波.在点模型双边滤波过程中,降噪点沿点的法向矢量调整位置,更新降噪点的坐标.点模型的双边滤波与图像的双边滤波类似,同样由空间高斯滤波器与特征保持的灰度相似滤波器组成.首先,定义一个通过降噪点的局部切平面,邻域点到切平面的高度对应于图像中的灰度级,邻域点到降噪点的距离对应于图像中的图像距离.然后,考虑邻域点与降噪点的高度相似性与距离,通过邻域点加权平均获得新的滤波位置.若存在点集,则其双边滤波过程的表达式为

$$P = \{(\mathbf{p}_i, \mathbf{n}_i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$$

式中: $\mathbf{n}_i$ 为任意点 $\mathbf{p}_i$ 的单位法向矢量.滤波过程的表达式为

$$\mathbf{p}_i := \mathbf{p}_i + f(\mathbf{p}_i)\mathbf{n}_i \quad (1)$$

$$f(\mathbf{p}_i) =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^k \langle \mathbf{p}_{ij} - \mathbf{p}_i, \mathbf{n}_i \rangle G_1(\|\mathbf{p}_{ij} - \mathbf{p}_i\|, \sigma_1) G_2(\langle \mathbf{p}_{ij} - \mathbf{p}_i, \mathbf{n}_i \rangle, \sigma_2)}{\sum_{i=1}^k G_1(\|\mathbf{p}_{ij} - \mathbf{p}_i\|, \sigma_1) G_2(\langle \mathbf{p}_{ij} - \mathbf{p}_i, \mathbf{n}_i \rangle, \sigma_2)}$$

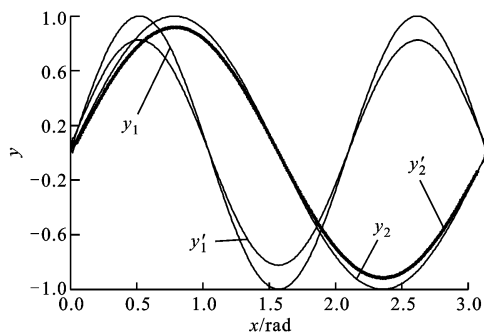
式中: $f(\mathbf{p}_i)$ 为滤波移动量; $\mathbf{p}_{ij}$ 为 $\mathbf{p}_i$ 的 k 最近邻域, $\mathbf{p}_{ij} \in P$; G_1 、 G_2 为高斯函数; σ_1 、 σ_2 分别为 G_1 、 G_2 对应的带宽.双边滤波在特征保持与光顺表面方面均具有优越的性能,在图像和点云滤波中获得了成功的应用,其收敛速度很快,一般 3~5 次迭代就能获

得光顺的效果.但是,由于其滤波移动量与局部邻域的梯度有关,所以对于高梯度区域、尖锐特征滤波时,将导致细微特征模糊.同时,伴随着迭代次数的增多,凸光滑表面出现体积收缩现象.

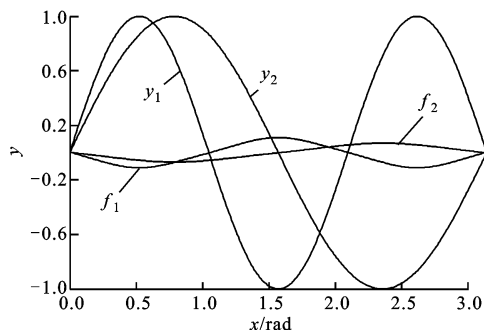
为说明双边滤波的特性,本文定义了 2 条二维正弦曲线: $y_1 = \sin(3x)$; $y_2 = \sin(2x)$,其角度 x 相当于图像上的棋盘距离, y 相当于图像的灰度级.对这 2 条曲线进行 100 次双边滤波,滤波结果与原始曲线的对比显示,曲线波峰和波谷的高曲率区域收缩明显,表明在高曲率区域双边滤波具有较高的收缩速率,如图 1a 所示.设 y_1 、 y_2 经过滤波后的曲线为 y'_1 、 y'_2 ,则其滤波移动量为

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= y'_1 - y_1 \\ f_2 &= y'_2 - y_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

滤波移动量曲线的曲率值与原始曲线相比,在对应点上的曲率获得显著地减小(见图 1b),这为减小滤波过程中模型的体积收缩提供了可能性.通过减小曲率的双边滤波移动量曲线的滤波,来获得较小收缩量的光顺曲线,而通过反向补偿则可以获得接近真实的曲线.



(a) 双边滤波结果



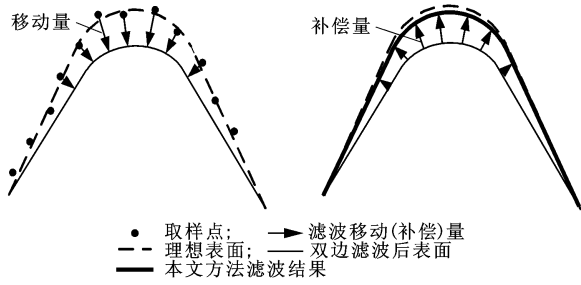
(b) 原始与滤波移动量曲线

图1 正弦曲线的双边滤波结果

1.2 补偿滤波

一个复杂的点模型具有很宽的曲率变化范围,

采用双边滤波器滤波时,不同曲率区域具有不同的收缩速度,从而产生不同程度的变形.高曲率区域由于收缩速率高,所以会更快地出现过平滑现象,从而模糊了细节特征.为了减小这些收缩变形量,本文首先对滤波移动量进行滤波处理,获得稳定的补偿值,然后在双边滤波获得的点模型基础上,从双边滤波移动的反方向移动降噪点,以获得最终滤波结果.由于反方向移动量取决于该点的稳定补偿量,因此该算法为补偿滤波,其工作原理如图 2 所示.



(a)多次双边滤波出现的过平滑 (b)补偿滤波过程
图 2 补偿滤波的原理图

设 $x^{(t)}$ 为 x 经过 t 次迭代滤波的结果, $x^{(0)}$ 为原始位置.新的滤波算法分为以下 4 个步骤.

步骤 1 对原始点云进行 t_1 次迭代双边滤波, p_i 经滤波后的位置为

$$u_i^{t_1} = u_i^{t_1-1} + f(u_i^{t_1-1})n_i; \quad u_i^0 = p_i^0 \quad (3)$$

式中 f 为双边滤波算子,与式(1)相同.

步骤 2 降噪点在点的法向矢量方向移动,计算 p_i 经过 t_1 次迭代双边滤波的移动量

$$m_i^{t_1} = \begin{cases} \|p_i^0 - u_i^{t_1}\| & (p_i^0 - u_i^{t_1})n_i \geq 0 \\ -\|p_i^0 - u_i^{t_1}\| & (p_i^0 - u_i^{t_1})n_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

步骤 3 滤波移动量经过 t_2 次迭代得到的补偿量为

$$c_i^0 = m_i^0 \\ c_i^{t_2} = c_i^{t_2-1} +$$

$$\frac{\sum_{j=1}^k \langle n_i, n_{ij} \rangle^2 (m_{ij}^{t_1} - m_i^{t_1}) G_3(\|u_i^{t_1} - u_{ij}^{t_1}\|, \sigma_3) G_4(m_{ij}^{t_1} - m_i^{t_1}, \sigma_4)}{\sum_{j=1}^k G_3(\|u_i^{t_1} - u_{ij}^{t_1}\|, \sigma_3) G_4(m_{ij}^{t_1} - m_i^{t_1}, \sigma_4)} \quad (5)$$

步骤 4 计算新的滤波点位置

$$p_i = u_i^{t_1} - c_i^{t_2} n_i \quad (6)$$

式中: G_3 、 G_4 为高斯函数; σ_3 、 σ_4 分别为 G_3 、 G_4 对应的带宽.在步骤 3 中,采用类似双边滤波的方法对滤波移动量进行平滑处理. G_3 考虑了邻域点的影响,

对于近邻点赋予较大的权值; G_4 考虑了邻域点滤波移动量相似性的影响,而滤波移动量越相似,权值越大.同时,本文考虑了邻域点法向矢量的不同对光顺结果产生的影响,采用降噪点与邻域点的法向矢量点积的平方作为权值函数,邻域点与降噪点的方向矢量越近似,其权值越大.对滤波移动量平滑时,点的位置没有改变,点间的邻接关系不变,因此在该步骤中建立点索引信息,只需要通过一次 KD 树搜索.

步骤 1 与步骤 3 可以采用不同的组合方式.组合方式 1 采用顺序滤波的方式,即采用一次步骤 1 滤波,随后进行一次步骤 3 滤波,为 $(t_1 + t_2)^n$ 的方式,该过程可以迭代 n 次.组合方式 2 采用分别多次滤波的方式,即采用 t_1 次步骤 1 滤波,进而采用 t_2 次步骤 3 滤波,为 $t_1 + t_2$ 的方式.实验表明,受到较小噪声污染的点云,采用组合方式 1 能够获得较为理想的模型,对于噪声幅值较大的点云,采用组合方式 2 更加有效.本文的讨论以组合方式 2 为主.

为获得较好的滤波效果,整个滤波过程需要自定义几个参数,如 $\sigma_1 \sim \sigma_4$,以及最近邻域数 k ,迭代次数 t_1 、 t_2 .在数值实验中,取 $\sigma_1 = D$, D 为点云的平均取样间距.由于滤波移动量集合具有与原始噪声点云相似的分布特性,因此本文设 $\sigma_3 = \sigma_1 = D$, $\sigma_4 = \sigma_2$.实验中,较少几次的滤波过程就可获得满意的效果,为简化参数选择,本文设双边滤波与补偿滤波采用相同的迭代次数,即 $t_1 = t_2$,设定最多的迭代次数为 10 次.

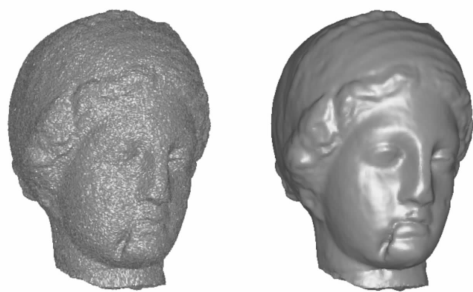
滤波核尺寸由 k 个最近距离邻域点组成, k 值越大,滤波计算耗费的时间就越长,但太小的 k 值会削弱模型表面光顺的效果,因此设 $k = 16$,并采用 KD 树以加快搜索过程.

2 实验与分析

采用 C++ 语言在 Microsoft windows pro XP 环境下,实现了新的滤波算法,采用 1.6 GB CPU 和 512 MB 内存,在 Geomagic Studio 环境下,所有模型都以 Flat 模式显示.

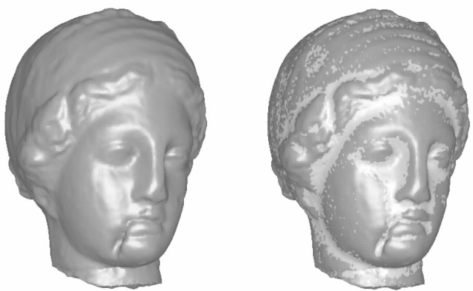
图 3 是复杂的 Igea 模型采用不同方法获得的滤波结果,噪声模型为原始模型沿点的法向矢量方向人为地添加高斯白噪声的效果,噪声标准差为 $0.5D$.采用 3 次双边滤波后的效果如图 3b 所示.图 3c 为采用本文方法经过 3 次双边滤波、3 次滤波移动量光顺后的效果.图 3b、3c 表明,双边滤波和本文滤波方法均能获得光滑表面的模型.图 3d 为本文方法滤波结果(黑色)与双边滤波结果(白色)的效果对

比,本文方法的滤波结果在模型的凹区域处于双边滤波模型内部,而在模型的凸区域则处于双边滤波模型外部,显示出较好的保持特征的能力。



(a) 噪声模型

(b) 双边滤波



(c) 本文方法

(d) 双边滤波与本文方法的比较

图3 Igea模型的滤波结果

为了量化评价本文方法与双边滤波方法,采用平均二次距离误差对滤波结果进行了分析。假设噪声点模型为 $P = \{p_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, 滤波后为 $P' = \{p'_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, 则平均二次距离误差

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^n \|p'_i - p_i\|^2 / n \right)^{1/2} \quad (7)$$

图4为Bunny模型采用双边滤波、本文方法滤波多次后的平均二次距离误差分布,随着迭代次数的增加,本文方法($t_1 = t_2$)与双边滤波方法相比,显示出更好的收敛性能。

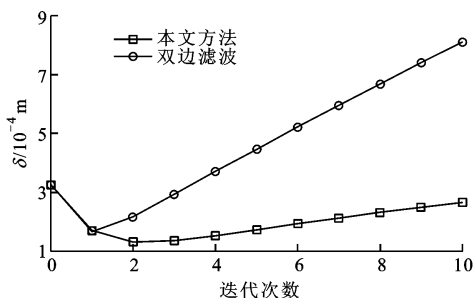


图4 Bunny模型双边滤波的平均二次距离误差分布

图5为Bunny模型经过多次迭代滤波后,与原始模型体积之比的变化趋势,由图可见,本文方法在体积保持方面比传统的双边滤波更加有效。

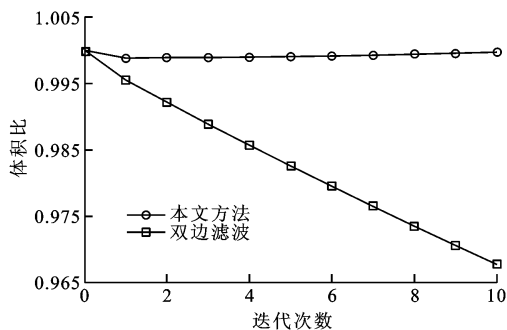


图5 Bunny模型的体积比随迭代次数的变化趋势

3 结论

本文提出了一种散乱点云补偿滤波的新方法,通过大量的实验数据,验证了该方法的有效性。获得的结论如下。

(1)采用双边滤波器计算获得滤波移动量,进行平滑处理后得到了形状补偿量。将双边滤波后的点向原始位置方向补偿,从而减少了滤波中的变形,获得了更多具有细节特征点模型,并且该方法具有体积保持的能力。

(2)与双边滤波相比,补偿滤波方法增加了补偿量计算过程,需要更多的内存资源存储中间结果,因此计算效率有所降低,并且不能避免尖锐特征模糊问题。

参考文献:

- [1] DESBRUN M, MEYER M, SCHR DER P, et al. Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow [C] // Proceeding of SIGGRAPH99. Los Angeles, USA: ACM, 1999: 317-324.
- [2] TAUBIN G. A signal processing approach to fair surface design [C] // Proceeding of SIGGRAPH95. Los Angeles, USA: ACM, 1995: 351-358.
- [3] TAUBIN G. Geometric signal processing on polygonal meshes [C] // Eurographics2000. Interlaken, Switzerland: ACM, 2000: 2-8.
- [4] ALEXA M, BEHR J, COHEN-ORD, et al. Computing and rendering point set surfaces [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2003, 9(1): 3-15.
- [5] FLEISHMAN S, COHEN-OR D, SILVA C. Robust

moving least-squares fitting with sharp features [C]// SIGGRAPH205. Los Angeles, USA: ACM, 2005: 544-552.

[6] 刘胜兰,周儒荣,聂军洪,等. 主曲率均匀的网格光顺 [J]. 计算机学报, 2004, 27(1): 79-84.
LIU Shenglan, ZHOU Rurong, NIE Junhong, et al. Mesh smoothing using principal curvature flow [J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(1): 79-84.

[7] 刘新国,鲍虎军,王平安. 体积保持的多分辨率多边形网格的光顺造型 [J]. 计算机学报, 2000, 23(9): 905-910.
LIU Xinguo, BAO Hujun, WANG Pingan, et al. Volume preserved multiresolution mesh modeling [J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(9): 905-910.

[8] XIAO C, MIAO Y, LIU S, et al. A dynamic balanced flow for filtering point-sampled geometry [J]. The Visual Computer, 2006, 22(3): 210-219.

[9] 陈仁杰,刘利刚,董光昌. 严格顶点约束的网格光顺算法 [J]. 浙江大学学报, 2010, 44(9): 1672-1675.
CHEN Renjie, LIU Ligang, DONG Guangchang.

Mesh smoothing with vertex tolerance constraints [J]. Journal of Zhejiang University, 2010, 44(9): 1672-1675.

[10] FLEISHMAN S, DRORI I, COHEN-OR D. Bilateral mesh denoising [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 950-953.

[本刊相关文献链接]

特征保持的点云精简技术研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(11)37-40.

移动最小二乘增量式多视点云数据融合算法. 西安交通大学学报, 2009, 43(9):46-50.

法向约束的多幅点云数据融合算法. 西安交通大学学报, 2009, 43(5):71-75.

拟蒙特卡罗自适应粒子滤波的机载无源定位算法. 西安交通大学学报, 2011, 45(9):34-39.

容积粒子滤波算法及其应用. 西安交通大学学报, 2011, 45(8):13-17.

(编辑 管咏梅)

http://www.jdxb.cn