

点模型的面元简化方法

曹晓叶,王知衍

(华南理工大学 计算机科学与工程学院,广州 510640)

(xycao@scut.edu.cn)

摘要:为了有效地简化稠密采样点模型,提出了一种基于面元(surfel)重建的点模型简化方法。该算法首先对每个采样点面元的初始半径进行估算,并同时根据曲率的变化确定每个面元的简化权值;然后采用 surfel 合并的方法来聚合、减少 surfel 图元的数量,按照计算的 surfel 权值,确定 surfel 合并的顺序,合并并重建成一个新的 surfel,合并过程中判断误差是否满足要求,满足则合并成功。如此迭代,直到 surfel 合并引起的误差达到阈值或 surfel 权值达到某个给定值。实验结果表明该算法能有效减少稠密采样点模型的点数,且在相同误差控制下简化率高于一般的基于纯采样点的简化算法;同时,简化模型能很好地保持原始模型的几何形状,防止简化后表面空洞现象的产生。

关键词:点模型;面元;简化

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Surfel decimation method for point models

CAO Xiao-ye, WANG Zhi-yan

(School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: To efficiently simplify the densely sampled point model, a point sample data reduction method based on surfel reconstruction was presented. The surfel radius was generated and surfel decimation coefficient based on curve was made. According to surfel decimation coefficient, surfels were combined and a new surfel was generated based on given error. The point model was returned when the error reached given value or the surfel coefficient reached given value. Experimental results show that the algorithm can effectively simplify the dense sampled point models, and the decimation ratio is higher than other point decimation algorithm under control of the same error; the simplified model can preserve the original geometric shapes very well and prevent surface inanition.

Key words: point model; surfel; decimation

0 引言

随着三维数码扫描仪的普及与应用,基于点的造型和绘制技术正得到越来越多的重视^[1-5]。相对于传统表达方式,点模型最主要的优点在于采样点之间没有任何连接关系,从而无需维护其拓扑关系,而使处理过程大为简化。对于由离散采样点表示的模型,为了绘制视觉上连续的图像,通常的处理方法是在图像空间中采样点绘制成具有一定大小的圆盘或正方形^[6];或在物体空间中将纯几何点的表达方式转换成基于面元的表达方式^[7]。无论采用何种方法,其处理费用仍然和表示模型的基本元素数成比例,因此希望优化点模型以减少表示物体的基本元素数。目前点模型的简化已经取得了一些研究成果,文献[8]将一些网格简化算法,如顶点聚类、增量式简化等应用于点采样模型,增量聚类法随机选定一系列数据点作为种子点,通过不断搜索其最近点扩展当前邻域,当邻域体积或曲率变化达到给定公差时停止生长,选择邻域内部点中最靠近重心的测量点代替其他点即完成了简化过程。但是这些方法虽然简单快速,但没有涉及优化策略,而且也不能事先控制简化误差。逐步从输入点云中移走采样点的贪婪方法^[9-10]不能保证全局上采样点的均匀分布。

虽然点模型的简化已经取得了一些研究成果,但是这些

方法因为自身设计的局限,限制了它的应用。已有的研究成果大多数借鉴了三角网格造型技术,或多或少地留有三角网格设计的影子,而没有考虑到点的几何特性。本文主要的工作集中在对点模型处理阶段的简化,提出一种基于面元(surfel)重建的点模型简化方法。该算法首先对每个采样点面元的初始半径进行估算,并同时根据曲率的变化确定每个面元的简化权值;然后采用 surfel 合并的方法来聚合、减少 surfel 图元的数量,按照计算的 surfel 权值,确定 surfel 合并的顺序,合并并重建成一个新的 surfel,合并过程中判断误差是否满足要求,满足则合并成功。如此迭代,直到 surfel 合并引起的误差达到阈值或 surfel 权值达到某个给定值。算法主要基于以下几点考虑:

- 1) 按曲率变化对 surfel 的简化权值进行排序,在保留点云的尖锐特征方面可获得较好的效果;
- 2) 以法向的偏移作为误差估计,合并过程中检查简化误差,对简化误差进行全局控制;
- 3) 合并后重建新的 surfel,对 surfel 的半径进行扩充,保证简化后的表面覆盖,防止表面空洞现象的产生。

1 面元初始半径估算及简化权值确定

1.1 面元初始半径估算

用 surfel 来代表一个采样点,这个点被表示为位于点切

收稿日期:2009-01-08;修回日期:2009-04-15。

基金项目:科技部科技型中小企业技术创新基金无偿资助项目(02C26214400224);广东省科技计划资助项目(2002A1020104)。

作者简介:曹晓叶(1975-),女,山西大同人,讲师,博士,主要研究方向:图形与图像处理;王知衍(1949-),男,浙江杭州人,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机视觉、虚拟现实。

向上的一个圆盘,各点的圆盘相互重叠并形成紧密的物体表面。surfel 与三角网格不同的是它无拓扑连接信息,而且是相互覆盖的。对于均匀采样点模型,每个面元的半径几乎相等,所以无须单独计算;但是对于非均匀采样点模型,需根据采样点的邻域分布,确定面元半径。为了使面元集能尽可能地完全覆盖模型表面,以及提高模型表面覆盖率的同时,减少面元重叠,需在采样点密集处减小面元半径,在采样点稀疏处增大面元半径。因此采用 K 个邻域点计算面元半径。设点模型的输入数据为每个点的位置 P , 即: $P = \{p_i | 1 \leq i \leq m\}$, 则每个采样点面元的半径估算公式为:

$$r_i = w \cdot \max(d_{pp_j}); 1 \leq j \leq k \quad (1)$$

其中 k 为采样点的邻域点数, d_{pp_j} 为采样点 p_i 到其邻域点 p_j 的距离, w 为一个调节系数,称为初始半径系数。采样点领域的大小和 surfel 初始半径系数的选择一起控制采样点元初始半径的大小。在实验中,采用 K 最近邻的方法确定采样点的邻域,根据实验结果,邻域点数控制在 8~10 之间和初始半径系数为 0.55~0.7 时,模型外表面有着比较好的视觉效果。

1.2 简化权值的确定

为了后续的简化过程,需要在确定采样点 surfel 半径的同时,对采样点的简化权值进行确定,简化权值小的采样点将被优先选择简化。根据采样点的曲率变化确定简化的权值。对于点模型上任一点 $p \in P$, 记 $N(p)$ 为点 p 的邻域点,对于已有法向的点模型,可以在采样点 p 的切平面上以采样点 p 为中心,建立一个局部坐标系;而对于没有法向的点模型,首先估计一个的局部参考平面 X :

$$X = \{x \in \mathbf{R}^3 | \langle x, N \rangle - d = 0\} \quad (2)$$

参考平面满足以下的加权距离平方和为最小:

$$\min_{Nd} \sum_{t \in N(p)} (\langle t, N \rangle - d)^2 \omega(t - p) \quad (3)$$

式中: N 为 X 的单位法向量, d 为坐标原点到参考平面 X 的距离, $\omega = e^{-\alpha^2}$ 为权值函数,越靠近 p 的采样点的权重越大。设 \bar{p} 为 p 在平面 X 上的垂直投影,在 X 上建立一个以 \bar{p} 为中心的局部坐标系。

对于数据点 p , 将它的 k 最近邻近点 $N(p)$ 中的每一点垂直投影到局部坐标系中,记它们在局部坐标系下的坐标为 $\{(x_t, y_t, z_t) | t \in N(p)\}$; 计算 k 最近邻近点到局部坐标系所在平面的累加距离作为 p 点的权值。

$$d_p = \sum_{t=1}^k z_t \quad (4)$$

当 p 位于平坦区域时,它的 k 最近邻近点到局部平面的累加距离和比较小,而当 p 位于曲率变化大的区域时,它的 k 最近邻近点到局部平面的累加距离和就比较大。根据累加和将采样点进行升序排列,完成权值排序。

算法 1 surfel 初始半径及简化权值的确定, 对点模型的每一个采样点 p , 具体步骤为:

1) 找到离该采样点最近 k 个相邻点, 作为 $N(p)$ 。应用式(1)中的方法计算 surfel 的初始半径 r 。

2) 对于没有法向的点模型中的采样点 p , 首先根据式(2)和(3)估计一个局部参考平面 X , 并以此参考平面的法向作为点 p 的法向, 设 \bar{p} 为 p 在平面 X 上的垂直投影, 在 X 上建立一个以 \bar{p} 为中心的局部坐标系。对于有法向的点模型, 则在采样点 p 的切平面上以采样点 p 为中心, 建立一个局部坐标系。

3) 由近及远地遍历 $N(p)$ 中的点 t , 计算其在上一步中建立的局部坐标系中的坐标 $\{(x_t, y_t, z_t) | t \in N(p)\}$ 。

4) 利用式(4)计算采样点 p 的简化权值 d_p 。并按从小到大的顺序对采样点排序, 将采样点插入相应排序队列中。

2 点模型的 surfel 简化

2.1 方法描述

所谓简化, 又称为数据缩小或数据减少。而模型简化就是在试图保持图形外观不变的情况下尽可能减小模型的绘制图元的数目。我们采用 surfel 合并的方法来聚合、减少 surfel 图元的数量。按照上一章计算的 surfel 权值, 确定 surfel 合并的顺序, 选择权值最小的 surfel, 将它与相邻的权值最小的 surfel 合并成一个新的 surfel, 判断合并后的误差是否满足要求, 满足则合并。如此迭代, 直到 surfel 合并引起的误差达到阈值或 surfel 权值达到某个给定值。

2.2 surfel 的合并

按照 surfel 简化权值的大小, 从 surfel 队列中选择一权值最小的采样点 p_i , 找到离该采样点最近的 k 个相邻点, 作为 $N(p)$, 在 $N(p)$ 中选择权值最小的点 p_j 和 p_i 合并, 合并后新生成的 surfel 的属性为:

$$P_{ij} = P_i \cdot \omega_1 + P_j \cdot \omega_2 \quad (5)$$

$$n_{ij} = n_i \cdot \omega_1 + n_j \cdot \omega_2 \quad (6)$$

$$r_{ij} = 0.5(|P_i - P_j| + r_i + r_j) \quad (7)$$

$$\omega_1 = \frac{r_i}{(r_i + r_j)} \quad (8)$$

$$\omega_2 = \frac{r_j}{(r_i + r_j)} \quad (9)$$

其中 P 为位置信息, r 为 surfel 半径, n 为采样点的法向。由于合并后新生成的 surfel 半径扩大, 简化后的点模型不会出现空洞。为了保证简化在给定的误差内, 还需要对简化所引起的曲面法向误差进行计算, 计算公式为:

$$\varepsilon_i = |(P_{ij} - P_i) \cdot n_i| \quad (10)$$

如果合并所引起的曲面法向误差大于给定的值, 则放弃此次合并; 否则合并成功, 合并生成的新的 surfel 的简化权值的计算公式为:

$$d_{ij} = c \times (d_i + d_j) \quad (11)$$

其中 c 为 surfel 参与合并的次数, 防止曲率较小的区域过多的参与合并。新生成的 surfel 将按照权值的大小插入排序队列中。

算法 2 模型简化算法, 具体步骤如下:

1) 从按简化权值排序的 surfel 队列中, 选择一权值最小的采样点 p , 找到离该采样点最近的 k 个相邻点, 作为 $N(p)$ 。

2) 从 $N(p)$ 中选择权值最小的采样点 q , 将其与采样点 p 进行合并, 并根据式(5)~(10) 计算合并后新生成 surfel 的相关属性, 以及合并所引起的曲面法向误差 ε_p 。

3) 如果 ε_p 小于给定值 ε , 则合并成功, 根据式(11) 计算新生成 surfel 的权值, 并将其插入到排序队列中, 同时将采样点 p 和 q 从队列中删除; 如果 ε_p 大于给定值 ε , 则取消合并, 并将采样点 p 移到排序队列末尾。

4) 检查队列中简化权值的最小值是否大于给定阈值, 大于则循环结束, 否则重复步骤 1) 到 3)。

5) 返回简化的点模型。

3 实验结果与分析

实验在 P4 2.4 GHz、内存 512 MB 的 PC 机上进行。图 1

为实验中用到的3个点模型,图2为对三个点模型用一般的直接对点云进行简化的方法得到的简化结果,图3为对三个点模型用本文的 surfel 重建和简化方法进行简化的实验结果。实验结果表明,直接在采样点上简化的方法,由于没有对 surfel 进行重建,绘制结果的表面会出现空洞,尤其在简化点多的地方更为明显;本文中采用的 surfel 重建和简化方法,由于在简化的同时,对合并的 surfel 半径进行了扩充,从而能最大限度的覆盖模型表面,避免了表面空洞的产生;方法有效地简化了点模型,从图3的简化结果来看,它能够保持模型的尖锐特征,直观且容易控制,很好地保持原始模型的几何形状。

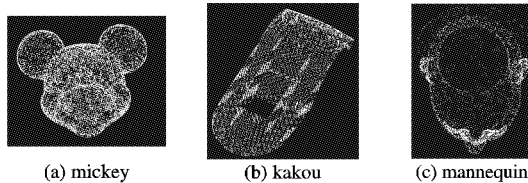


图1 点云原模型

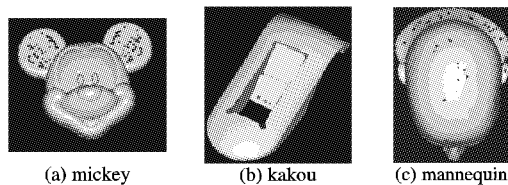


图2 点简化实验结果

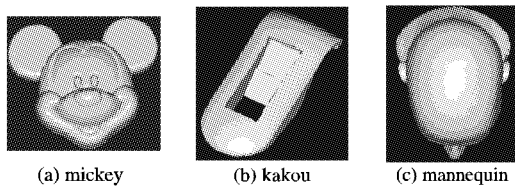


图3 surfel 简化实验结果

表1为给定相对误差 $\varepsilon = 0.001$ 下的实验统计结果。从简化后模型的点数可以看出,在相同误差控制下,用 surfel 重建进行的点模型简化的点数比用直接对点云进行简化的点数要少。这是因为重建的 surfel 比直接用一点取代有更强的表达能力,可以更好地逼近采样点的局部表面。尤其对于比较光滑的表面,例如点模型 kakou 的简化结果,用本文方法比直接对点云进行简化的方法简化结果的点数要少得多。表1中的时间包括所有预处理、surfel 重建和简化的时间,从其时间统计可以看到,基于 surfel 重建的简化时间比一般直接对点云进行简化的简化时间长,这是因为本文方法的预处理时间长,每次简化需要对合并的 surfel 进行重建。

表1 点模型的简化结果和处理时间

模型名	采样 点数	直接对点云进行简化		surfel 重建和简化	
		简化点数	时间/s	简化点数	时间/s
mickey	38 431	6 985	11.3	6 032	17.80
kakou	57 726	8 064	16.6	4 710	22.30
mannequin	12 772	2 098	3.8	1 659	4.65

图4的(b)、(c)、(d)分别为 mickey 模型用 surfel 重建的方法在误差为 0.001, 0.002, 0.003 控制下,简化到 6 032、4 921 和 3 815 个点的模型。从该结果可以看到,放大允许的误差范围可以得到更简化的点模型,但同时也简化了某些表面细节,这从图4的几个简化模型对应的光线跟踪绘制效果图可以看出。对比(a)中的原始 mickey 点模型,简化后的结

果用了很少的采样点,却很好地保持了 mickey 模型的几何形状。

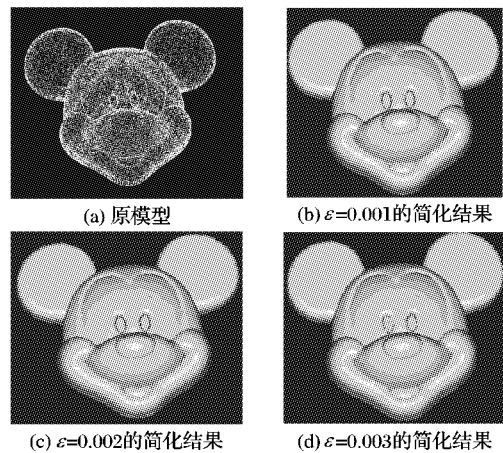


图4 在不同误差控制下,点模型 mickey 的 surfel 简化结果

4 结语

本文算法根据曲率的变化,对每个采样点面元的简化权值进行确定。按照面元权值的顺序采用 surfel 合并的方法来聚合、减少 surfel 图元的数量,使得简化模型能够很好地保持原始模型的几何形状,尤其是尖锐部分的特征。实验结果表明该算法能有效减少稠密采样点模型的点数,且在相同误差控制下简化效率高于一的基于纯采样点的简化算法;通过控制逼近误差,可以方便地得到不同简化程度的点模型。同时,由于对合并的 surfel 进行了重建,避免了部分区域真空现象的产生,简化模型表面基本没有空洞出现。

参考文献:

- [1] ALEXA M, BEHR J, FLEISHMAN S, *et al.* Computing and rendering point set surfaces [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2003, 9(1): 3-15.
- [2] SCHAUFLEER G, JENSEN W H. Ray tracing point sampled geometry [EB/OL]. [2008-11-20]. http://groups.csail.mit.edu/graphics/pubs/egwr2000_raytracing.pdf.
- [3] PAULY M, KEISER R, KOBELT P L, *et al.* Shape modeling with point-sampled geometry [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 641-650.
- [4] OHTAKE Y, BELYAEV A, ALEXA M, *et al.* Multi-level partition of unity implicits [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 463-470.
- [5] ADAMS B, DUTRÉ P. Interactive Boolean operations on surfel-bounded solids [EB/OL]. [2008-11-20]. <http://graphics.stanford.edu/projects/lgl/papers/ad-ibosbs-03/ad-ibosbs-03.pdf>.
- [6] STAMMINGER M, DRETTAKIS G. Interactive sampling and rendering for complex and procedural geometry [C] // *Proceedings Eurographics Rendering Workshop*. New York: ACM, 2001: 151-162.
- [7] ZWICKER M, PFISTER H, BAAR J V, *et al.* Surface splatting [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Serious*. Los Angeles, USA: ACM SIGGRAPH, 2001: 371-378.
- [8] PAULY M, GROSS M, KOBELT L. Efficient simplification of point-sampled surfaces [C] // *Proceedings of the Conference on Visualization*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 163-170.
- [9] LINSSEN L. Point cloud representation [D]. Karlsruhe: University at Karlsruhe, 2001.