



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104036552 B

(45)授权公告日 2017.05.10

(21)申请号 201410283442.1

(22)申请日 2014.06.23

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104036552 A

(43)申请公布日 2014.09.10

(73)专利权人 中国科学院自动化研究所
地址 100190 北京市海淀区中关村东路95号

(72)发明人 严冬明 郭建伟 张晓鹏

(74)专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021
代理人 宋焰琴

(51)Int.Cl.
G06T 17/30(2006.01)

(56)对比文件
CN 101436303 A,2009.05.20,
CN 101436303 A,2009.05.20,
US 2002/0167518 A1,2002.11.14,
Thomas Schlomer et al..Farthest-point

optimized point sets with maximized minimum distance.《In High Performance Graphics Proceedings》.2011,第135-142页.
Dongming Yan et al..Isotropic remeshing with fast and exact computation of restricted Voronoi diagram.《Computer Graphics Forum》.2009,第28卷(第5期),第1445-1454页.
Dongming Yan et al..Gap processing for adaptive maximal Poisson-disk sampling.《ACM Trans.on Graphics》.2013,第32卷(第5期),第148:1-15页. (续)

审查员 罗信

权利要求书2页 说明书5页 附图8页

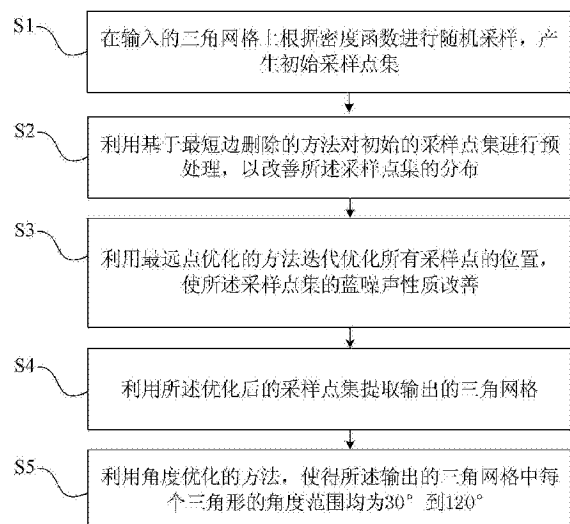
(54)发明名称

基于最远点优化的蓝噪声网格生成方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于最远点优化的蓝噪声网格生成方法,该方法包括以下步骤:在输入的三角网格上根据密度函数进行随机采样,产生初始采样点集;提出一种基于最短边删除的方法对初始的采样点集进行预处理,获得一个分布良好的点集;提出最远点优化的方法并用于进一步迭代优化所有采样点的位置,使最终得到的采样点集具有很好的蓝噪声性质;利用优化后的采样点集,直接提取出三角网格;提出一种角度优化的方法,使得输出网格中每个三角形的角度范围均为[30°,120°]。本发明为高质量的曲面重新网格化提供了解决方案,而且获取的网格具有很好的蓝噪声性质,适用于物理模拟、光照渲染以及几何建模等。

CN 104036552 B



[接上页]

(56)对比文件

Mohamed S. Ebeida et al..Efficient and good Delaunay meshes from random points.《Computer-Aided Design 》.2011,第43卷(第11期),第1506-1515页.

Thomas Schlomer et al..Farthest-point optimized point sets with maximized minimum distance.《In High Performance Graphics Proceedings》.2011,第135-142页.

1. 一种基于最远点优化的蓝噪声网格生成方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

步骤S1、由用户指定采样点数目 n ,在输入的三角网格上根据密度函数进行随机采样,产生初始采样点集 $X = \{x_i\}_{i=1}^n$;

步骤S2、每次找到所述采样点集中距离最近的一对采样点,设其中一个采样点为 x_i ,然后将点 x_i 移动到最远点 f 的位置,重复执行上述步骤,直到找不到可以移动的采样点;

步骤S3、利用优化后的采样点集提取输出的三角网格;

步骤S4、利用角度优化的方法,使得所述输出的三角网格中每个三角形的角度范围均为 $[30^\circ, 120^\circ]$;

所述步骤S2包括以下分步骤:

步骤S2.1、对于所述采样点集 X 中的每一个点 x_i ,计算该采样点的局部最小距离 $d_{x_i} = \min_{x_j \in \{X\}} \text{distance}(x_i, x_j)$,其中 $\text{distance}(x_i, x_j)$ 表示采样点 x_i 和 x_j 之间的距离;

步骤S2.2、将所述采样点 x_i 移动到最远点 f 的位置,如果所述最远点 f 与采样点 x_i 相同,则认为采样点 x_i 没有移动;

步骤S2.3、重复步骤S2.1和S2.2,直到所有采样点都没有移动,则迭代终止;

所述步骤S2.2包括以下分步骤:

步骤S2.2.1、根据每个采样点的权重,计算采样点集的三维Power图,然后进一步计算该三维Power图与输入曲面网格三角形的交集,得到限制Power图,其对偶三角化称为限制正则三角化,限制正则三角化后得到限制正则三角形,所述权重定义为该点处的密度函数大小;

步骤S2.2.2、将采样点 x_i 从采样点集 X 中删除,局部更新限制Power图和限制正则三角化,计算每个正则三角形的顶点到其对应Power顶点的距离 r , r 的最大值记为 r_{max} ,对应的Power顶点记为最远点 f ,如果 $r_{max} > d_{x_i}$,则在所述最远点 f 处插入一个新的采样点代替原来的采样点 x_i ,否则将采样点 x_i 重新插回到原来的位置。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,在所述步骤S2.2.2中,当删除一个采样点 p 时,首先删除包含该采样点 p 的限制正则三角形,然后找到所有受该采样点 p 影响的输入曲面网格三角形,并用其他的采样点对这些输入三角形进行重新分割裁剪,计算得到局部的限制Power图和限制正则三角化。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,当在所述采样点 v 处插入一个新采样点时,首先删除受采样点 v 影响的限制正则三角形,然后在该采样点 v 的邻域内,对输入曲面网格三角形重新计算局部限制Power图和限制正则三角化。

4. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法,其特征在于,所述步骤S3为:首先计算优化后采样点集的限制Power图,然后对于限制Power图的每个顶点,如果该顶点是两个等分线 (x_i, x_j) 和 (x_i, x_k) 的交点,那么 (x_i, x_j, x_k) 就可以形成一个三角形 $\Delta x_i x_j x_k$,其中 x_i, x_j, x_k 是三个采样点;处理完所有的顶点便得到限制Power图的对偶网格三角形。

5. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法,其特征在于,所述步骤S4为:首先找到输出网格中所有包含小于 30° 角的坏角的坏三角形,对每一个坏三角形,其坏角对应的顶点记为 x_1 ,与坏角相对的两个顶点分别记为 x_2 和 x_3 ,然后调整顶点 x_2 和 x_3 的权重为 cw_i , w_i 为对应顶

点的原始权重, c 为调整因子, 取值范围 $[0.4-0.8]$, 然后依次处理顶点 x_1 、 x_2 和 x_3 , 处理的顺序是优先处理坏角对应的顶点, 且每一次处理的过程为移动该点到其最远点, 该过程不断进行直到所有的角度都大于 30° 。

基于最远点优化的蓝噪声网格生成方法

技术领域

[0001] 本发明属于计算机图形处理技术领域,具体涉及计算机图形处理中的蓝噪声采样技术和网格生成技术,特别涉及一种从随机分布的采样点集进行优化采样点位置,并利用采样点生成三角网格的方法。

背景技术

[0002] 网格模型是三维形体在计算机中表示的主要方法之一。网格模型主要包括三角形,四边形或者多边形网格。其中,三角形网格由于结构简单,易于操作从而受到了广泛的关注。因此,高质量三角形网格的生成方法也成为了图形学以及数字几何处理领域的一个研究热点。常见的三角形网格获取有三种方法:(1)通过激光扫描仪扫描得到的粗糙网格数据;(2)通过离散连续曲面;以及(3)通过等值面提取得到的网格模型。通常,这些模型有数据量大,三角形网格质量差等缺点,不能直接用于比如有限元模拟,计算机动画等高级应用。Yan等人(D.-M.Yan,B.Lévy,Y.Liu,F.Sun,and W.Wang,“Isotropic remeshing with fast and exact computation of restricted Voronoi diagram,”Computer Graphics Forum,vol.28,no.5,pp.1445-1454,2009)提出了提出一个在网格模型上计算准确的Voronoi图的算法,在这个算法的基础上,结合快速的重心Voronoi图(Centroidal Voronoi Tessellation-CVT)计算框架,生成高质量的网格。这个算法效率高,可以处理带噪声的网格,是目前网格生成领域公认的最好的方法。

[0003] 但是现有的曲面网格生成研究主要针对如何提高三角形的质量,而忽略了网格顶点的整体分部。在许多领域的应用中,都要求采样点的分布既满足随机性又满足均匀性,这些性质统称为蓝噪声性质,蓝噪声性质和人类的视觉感知系统密切相关,在图像合成,真实感绘制,机器人路径规划等领域有着大量应用。现有的蓝噪声采样方法可以大致分成三类:(1)泊松圆盘采样方法及其变种;(2)基于Lloyd迭代的优化方法;(3)基于样本或者规则的生成方法。其中,Schlömer等人(SCHLÖMER,T.,HECK,D.,DEUSSEN,O.:Farthest-point optimized point sets with maximized minimum distance.In High Performance Graphics Proceedings (2011),pp.135-142.)提出利用最远点采样优化(Farthest Point Optimization-FPO)算法计算蓝噪声采样点集。该方法的核心思想是最大化采样点集中任意两点的最小距离。FPO将采样点集的蓝噪声性质进一步提高。但是,现有的FPO只能处理二维平面的等半径采样,不能处理变半径和曲面上的采样。

[0004] 蓝噪声采样以及网格生成分别都有几十年的研究历史,但是很少有工作将两者结合起来同时研究。近年Ebeida等人(Ebeida,M.S.,Mitchell,S.A.,Davidson,A.A.,Patney,A.,Knupp,P.M.,and Owens,J.D.(2011).Efficient and good Delaunay meshes from random points.Computer-Aided Design,43(11):1506-1515.)提出一个有效的算法将具有蓝噪声性质的最大化泊松圆盘采样点集(MPS)进行三角化,得到的网格具有很多良好的性质。Yan和Wonka(Yan,D.-M.and Wonka,P.(2013).Gap processing for adaptive maximal Poisson-disk sampling.ACM Trans.on Graphics,32(5):148:1-148:15.)首次

提出网格曲面上的最大化泊松圆盘采样 (Maximal Poisson-disk Sampling-MPS) 方法及重新网格化方法,推动了蓝噪声网格生成的发展。

发明内容

[0005] 本发明提供一种在曲面网格上进行蓝噪声优化采样,并利用优化的采样点生成高质量三角网格的方法,以解决现有的网格生成方法生成的网格顶点分布差、不适于物理模拟、且不易控制最小角度的缺点。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供一种基于最远点优化的蓝噪声网格生成方法,该方法包括以下步骤:

[0007] 步骤S1、在输入的三角网格上根据密度函数进行随机采样,产生初始采样点集;

[0008] 步骤S2、利用基于最短边删除的方法对初始的采样点集进行预处理,以改善所述采样点集的分布;

[0009] 步骤S3、利用所述优化后的采样点集提取输出的三角网格;

[0010] 步骤S4、利用角度优化的方法,使得所述输出的三角网格中每个三角形的角度范围均为 $[30^{\circ}, 120^{\circ}]$ 。

[0011] 本发明采用计算机图形处理的技术,对一个初始分布的采样点集优化得到具有蓝噪声性质的点集,进而提取生成蓝噪声网格,使得网格的顶点满足随机且均匀的分布,因而没有任何结构信息,可以适用于裂痕、爆炸等的物理模拟。同时提出一种角度优化的方法,可以控制网格的角度都大于 30° ,生成的网格质量高。

附图说明

[0012] 图1是本发明最远点优化的蓝噪声网格生成方法的流程图;

[0013] 图2是根据本发明一实施例输入的三角网格模型;

[0014] 图3是根据本发明一实施例产生的初始采样点集;

[0015] 图4A~图4C是根据本发明一实施例最远点 f 的二维示意图,其中图4A是一个采样点集,正方形是采样区域,图4B中 f 是最远点,它定义为采样区域中最大空圆的圆心,即该点是采样区域中距离所有采样点距离最远的点,图4C表明在对采样点进行De launay三角化(在非均匀采样情况下对应正则三角化)后,最远点 f 为最大外接圆的圆心;

[0016] 图5是根据本发明一实施例的限制Power图和限制正则三角化示意图;

[0017] 图6是根据本发明一实施例最远点优化后的采样点集;

[0018] 图7是根据本发明一实施例得到的三角网格模型;

[0019] 图8A~图8C是本发明与现有技术的采样点集频谱分析结果对比图,其中图8A代表Yan2009利用重心Voronoi图(CVT)方法对采样点集进行优化的方法,图8B代表最大化泊松圆盘采样(MPS)的方法,图8C是采用本发明最远点优化(FPO)的方法;

[0020] 图9A~图9D是本发明与现有技术的生成网格结果对比图,其中图9A是输入的网格模型,图9B、图9C、图9D分别是采用CVT、MPS和FPO方法得到的结果。

具体实施方式

[0021] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,以下结合具体实施例,并参照

附图,对本发明进一步详细说明。

[0022] 图1是本发明基于最远点优化的蓝噪声网格生成方法的流程图,如图1所示,本发明方法包括以下步骤:步骤S1、在输入的三角网格上根据密度函数进行随机采样,产生初始采样点集;步骤S2、利用基于最短边删除的方法对初始的采样点集进行预处理,以改善所述采样点集的分布;步骤S3、利用所述优化后的采样点集提取输出的三角网格;步骤S4、利用角度优化的方法,使得所述输出的三角网格中每个三角形的角度范围均为 $[30^\circ, 120^\circ]$ 。

[0023] 下面对上述每个步骤进行更加详细的说明。

[0024] 步骤S1、在输入的三角网格上根据密度函数进行随机采样,产生初始采样点集

[0025] 本发明首先由用户指定采样点数目 n ,然后在输入的三角网格上根据密度函数产生初始采样点集 $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ 。在均匀采样情况下,密度函数为一常数,首先在网格上随机选择一个三角形,使得选择某一三角形的概率与该三角形的面积成正比,然后在选择的三角形内部再随机产生一个采样点。这个过程进行迭代直到产生 n 个采样点。在非均匀采样情况下,本发明利用每个点处的曲率大小作为该点的密度函数,因此选择某一三角形的概率与该三角形的加权面积成正比。设某一三角形的三点坐标为 P, Q, R ,对应的曲率为 a, b, c ,该三角形的加权面积计算公式为

$$[0026] \quad A_w = \frac{|(Q - P) \times (R - P)|}{2} \cdot \frac{(\sqrt{|a|} + \sqrt{|b|} + \sqrt{|c|})}{3}$$

[0027] 图2是输入的三角网格Dragon模型,图3是在Dragon模型上初始采样的结果。

[0028] 步骤S2、利用基于最短边删除的方法对初始的采样点集进行预处理,以改善所述采样点集的分布

[0029] 该步骤是对初始的采样点集进行预处理,预处理的结果可以用于加速后面迭代优化的速度。该方法每次找到采样点集中距离最近的一对点,设其中一个采样点为 x_i ,然后将点 x_i 移动到最远点 f 的位置。重复执行上述步骤,直到找不到可以移动的采样点,则迭代终止。此时得到一个分布良好的采样点集。

[0030] 该步骤利用最远点优化的方法迭代优化所有采样点的位置,使所述采样点集的蓝噪声性质改善。

[0031] 该步骤从初始的随机采样点集出发,迭代的优化每个采样点的位置,每次将采样点都移动到当前计算得到的最远点。

[0032] 所述步骤S2包括以下步骤:

[0033] 步骤S2.1、对于采样点集 X 中的每一个点 x_i ,计算该点的局部最小距离 d_{x_i} 。

[0034] 对一个采样点 x_i ,其局部最小距离定义为:

$$[0035] \quad d_{x_i} = \min_{\forall x_j \in \{X \setminus x_i\}} \text{distance}(x_i, x_j)$$

[0036] 在均匀采样点的情况下,每个点的权重为常数,因此两个点之间的距离为普通的欧式距离,即 $\text{distance}(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|$ 。在非均匀采样的情况下,每个采样点具有不同的权重 w ,此时两个点 (x_i, w_i) 和 (x_j, w_j) 之间的距离定义为其Power距离:

$$[0037] \quad \text{distance}(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|^{2-w_i-w_j}$$

[0038] 步骤S2.2、将点 x_i 移动到最远点 f 的位置,如果最远点 f 与 x_i 相同,则认为 x_i 没有移动。

[0039] 图4A~图4C是最远点 f 的二维平面示意图,其中图4A是一个采样点集,正方形是采样区域,图4B中 f 是最远点,它定义为采样区域中最大空圆的圆心,即该点是采样区域中距离所有采样点距离最远的点,图4C表明在对采样点进行Delaunay三角化(在非均匀采样情况下对应正则三角化)后,最远点 f 为最大外接圆的圆心。在曲面网络上,难点在于如何计算曲面上的已有采样点集中的最远点,以及如何在曲面上删除、插入采样点使得采样点集满足最远点性质。本发明拟提出利用曲面上的限制正则三角化(Restricted Regular Triangulation-RRT)及其对偶Power图(Restricted Power Diagram-RPD)来计算曲面上的最远点插入位置。由于均匀采样情况下的Voronoi图和Delaunay三角化,分别是Power图和正则三角化的特例,因此为叙述简洁,本发明只针对Power图和正则三角化。

[0040] 步骤S2.2.1、首先计算所有采样点的三维Power图,然后进一步计算该三维Power图与输入曲面网络的交集,得到RPD,其对偶三角化称为限制正则三角化。计算Power图和正则三角化是计算机图形学的基本问题,Yan等人[Yan2009]提出了一个快速计算曲面网络上RPD和RRT的方法,本发明拟利用开源的几何处理库CGAL(<http://www.cgal.org>),并结合Yan的方法实现该计算。图5是本发明一实施例曲面上的RPD以及RRT示意图,其中,RPD的顶点包含三种情况:类型A为原始输入网格顶点;类型B是输入网格边与Power图的中切面交点;类型C是输入网格三角形与Power图的边的交点。最远点 f 即为某一个类型为C的限制Power顶点。

[0041] 步骤S2.2.2、将点 x_i 从 X 中删除,局部更新RPD和RRT,计算每个正则三角形的顶点到其对应Power顶点的距离 r , r 的最大值记为 r_{max} ,对应的Power顶点记为 f (该点称为最远点)。如果 $r_{max} > d_{x_i}$,则在 f 处插入一个新的采样点代替原来的 x_i ,否则将 x_i 点重新插回到原来的位置。局部更新限制Power图和限制正则三角化的步骤为:当删除一个采样点 p 时,首先删除包含该点 p 的限制正则三角形,然后找到所有受该点影响的输入曲面网格三角形,并用其他的采样点对这些输入三角形进行重新分割裁剪,计算得到局部的限制Power图和限制正则三角化;相似地,当在点 v 处插入一个新采样点时,首先删除受点 v 影响的限制正则三角形,然后在 v 的邻域内,对输入曲面网格三角形重新计算局部限制Power图和限制正则三角化。由于使用最短边删除的方法已经获得了一个分布良好的点集,因此当删除一个点时,不用在整个曲面网络上查找最远点。只需要在该采样点的2-ring邻域内查找最远点即可,这样可以大大加快迭代优化的速度。

[0042] 步骤S2.3、将点集 X 中的所有点都处理一遍称为一次迭代。该过程不断进行下去直到在某一次迭代中所有采样点都没有移动,则迭代终止。即得到优化后的采样点集。

[0043] 该步骤中,将点集 X 中的每一个点都删除和重新插入到最远点,处理完一遍即完成一次迭代。然后重复的执行该步骤直到所有的点都不再移动,迭代进行收敛,得到采样点满足蓝噪声的性质。图6是在Dragon模型上进行最远点优化后的结果,采样点的分布已经很均匀。

[0044] 步骤S3、利用所述优化后的采样点集提取输出的三角网格

[0045] 该步骤从优化后的采样点集中直接提取三角网格,首先计算优化后采样点集的限制Power图,然后对于限制Power图的每个顶点,如果该顶点是两个二等分线(x_i, x_j)和($x_i,$

x_k)的交点,那么 (x_i, x_j, x_k) 就可以形成一个三角形 $\Delta x_i x_j x_k$,其中 x_i, x_j, x_k 是三个采样点。处理完所有限制Power图的顶点便得到限制Power图的对偶三角网格,即输出网格。图7是针对Dragon模型的网格化结果。

[0046] 步骤S4、利用角度优化的方法,使得所述输出的三角网格中每个三角形的角度范围均为 $[30^\circ, 120^\circ]$;

[0047] 在均匀采样情况下,输出三角网格的所有角度都严格限定在 $[30^\circ, 120^\circ]$ 之间,但是在非均匀采样情况下不满足此性质。因此本发明提出一种对角度进行优化的方法,该方法首先找到输出网格中所有包含小于 30° 角(称为“坏角”)的三角形(称为“坏三角形”),对每一个“坏三角形”,其“坏角”对应的顶点记为 x_1 ,与“坏角”相对的两个顶点记分别为 x_2 和 x_3 ,然后调整顶点 x_2 和 x_3 的权重为 cw_i (w_i 为对应顶点的原始权重, c 为调整因子,取值范围 $[0.4-0.8]$)。然后依次处理顶点 x_1, x_2 和 x_3 ,处理的顺序是优先处理“坏角”对应的顶点。每一次处理的过程为所述移动该点到其最远点。该过程不断进行直到所有的角度都大于 30° 。

[0048] 本发明提出曲面上最优点优化的方法对初始的采样点集进行优化,得到的点集具有很好的蓝噪声的性质。图8是本发明的方法与前人的方法采样点频谱分析结果的对比图,其中图8A代表Yan2009利用重心Voronoi图(CVT)方法对采样点集进行优化的方法,图8B代表最大化泊松圆盘采样(MPS)的方法,Ebeida2011和Yan2013都是属于MPS方法,图8C是采用本发明最远点优化(FPO)的方法。在每一个子图中,从左向右依次是:采样结果;频谱功率图;径向均值和各向异性。从对比结果中可以看出,CVT方法的功率图含有多个很强的峰值,不具备蓝噪声的性质;MPS方法和FPO方法都能产生具有蓝噪声的点集,但FPO方法的频谱过渡更加平滑,因此产生的点集具有更好的蓝噪声性质。

[0049] 图9A~图9D是本发明的方法与前人的方法生成网格结果的对比图,图9A是输入的网格模型,图9B、9C、9D分别是采用CVT、MPS和FPO方法得到的结果。本发明对网格质量进行了统计,FPO的方法生成的网格角度都在 $[30^\circ, 120^\circ]$ 之间,而CVT和MPS不能对角度进行保证。因此,采用本发明提取的三角网格质量最高。

[0050] 本发明的方法的特色和创新在于,将最远点优化的方法推广到变半径采样,以及三维网格曲面的采样,提出利用曲面上的限制正则三角化及其对偶Power图来对曲面上的FPO采样方法进行理论分析,并且提出一个完整的方法框架计算曲面上的最远点插入位置,从而得到高质量的蓝噪声采样。最后,利用优化后的采样点提取得到高质量的蓝噪声网格。

[0051] 上述实验结果和基于最远点优化的蓝噪声网格生成方法,可以用于物理模拟、数字媒体处理及科学可视化等应用领域,具有较高的实际应用价值。

[0052] 以上所述的具体实施例,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

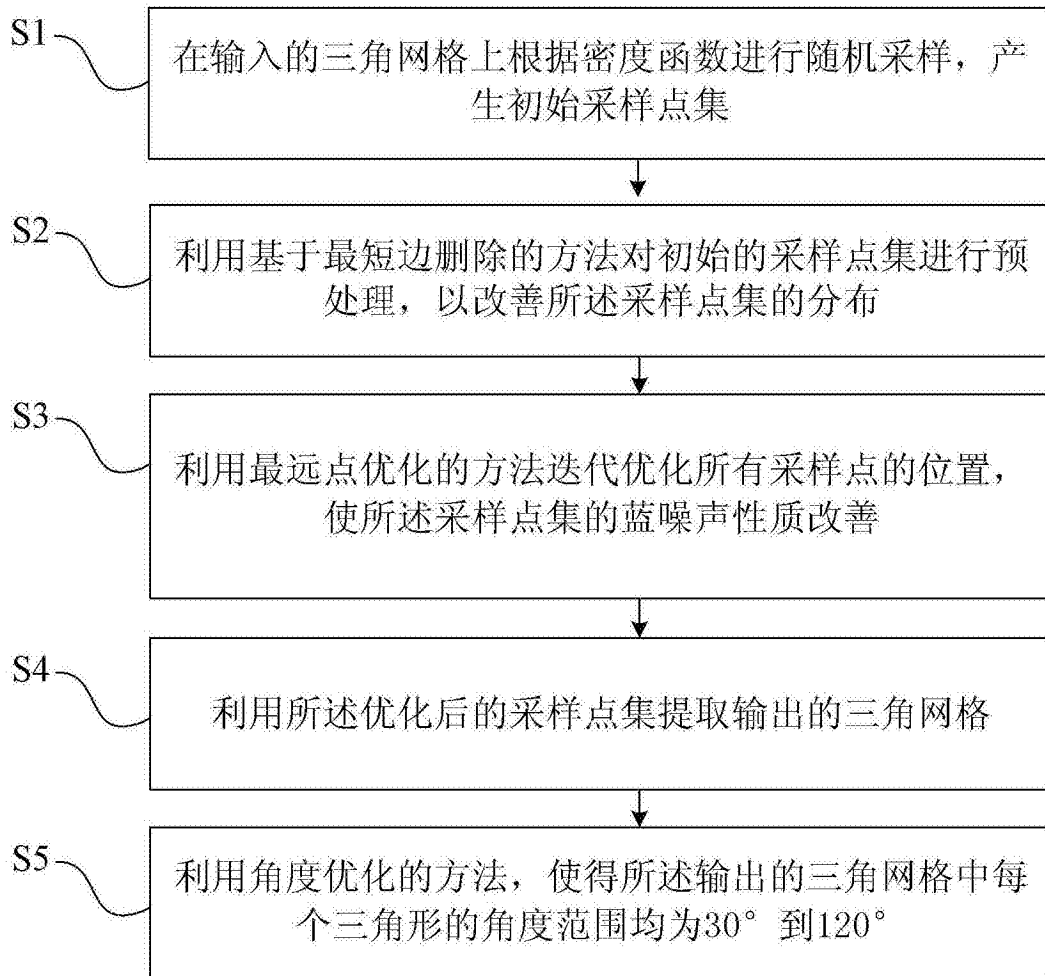


图1

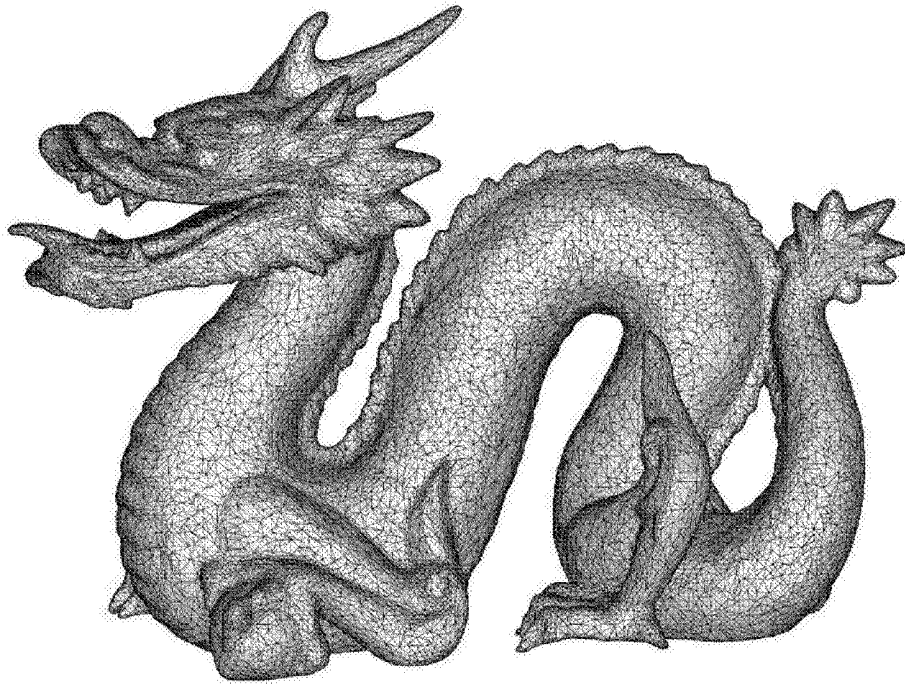


图2

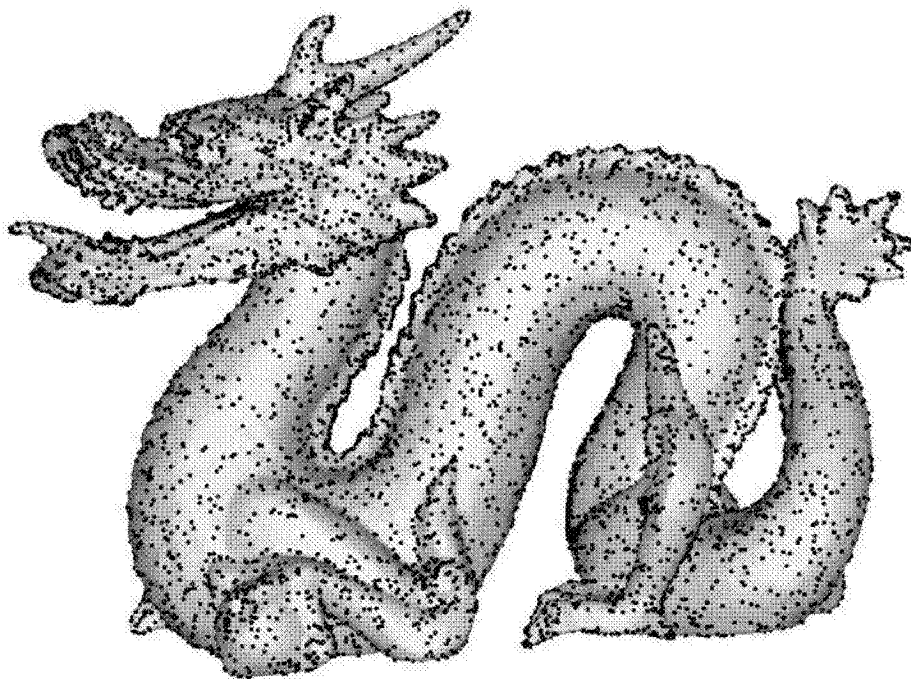


图3

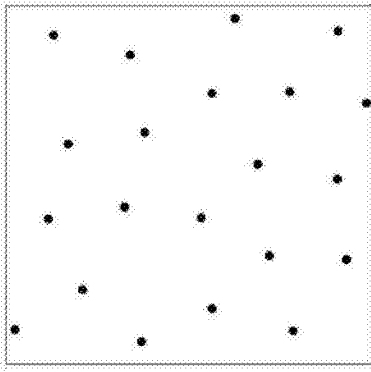


图4A

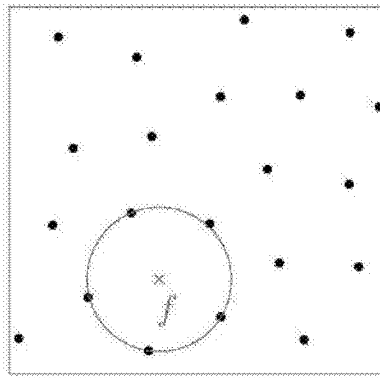


图4B

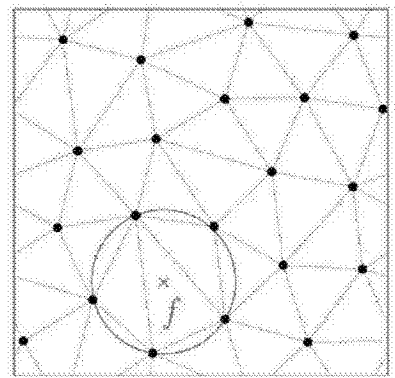
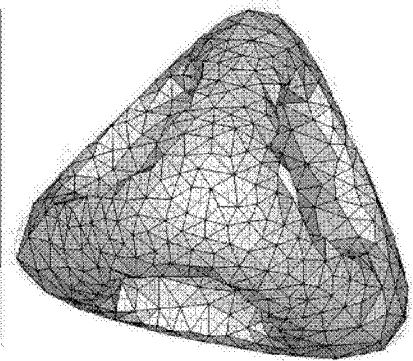
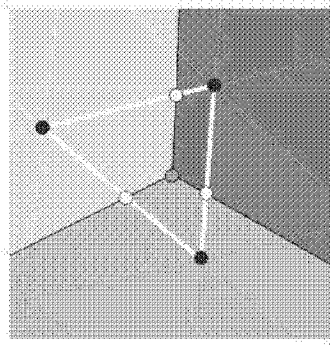
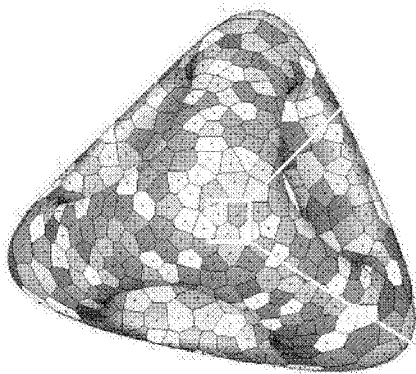


图4C



● 类型A ○ 类型B ● 类型C

图5

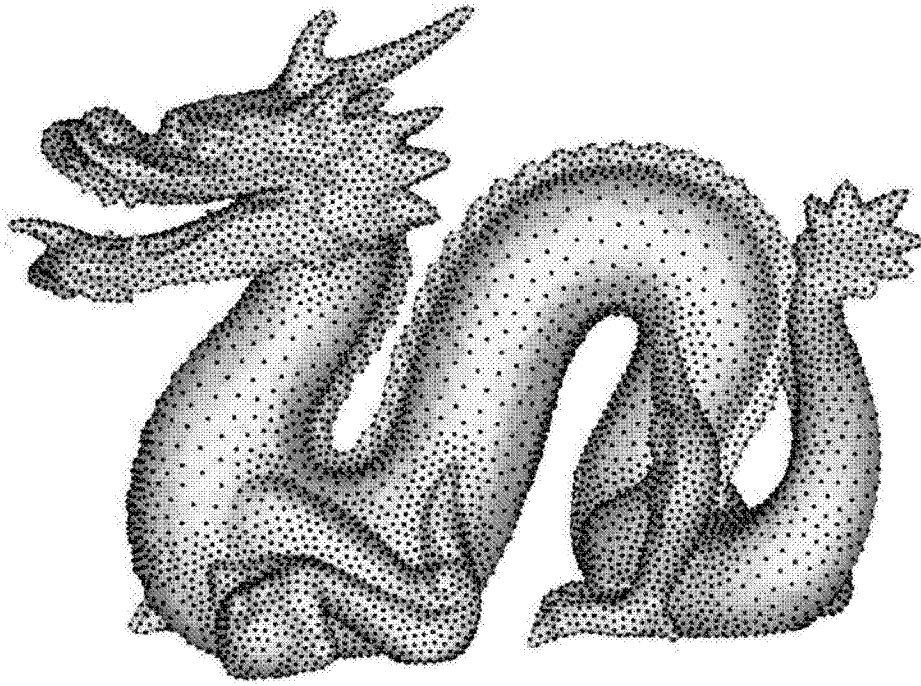


图6

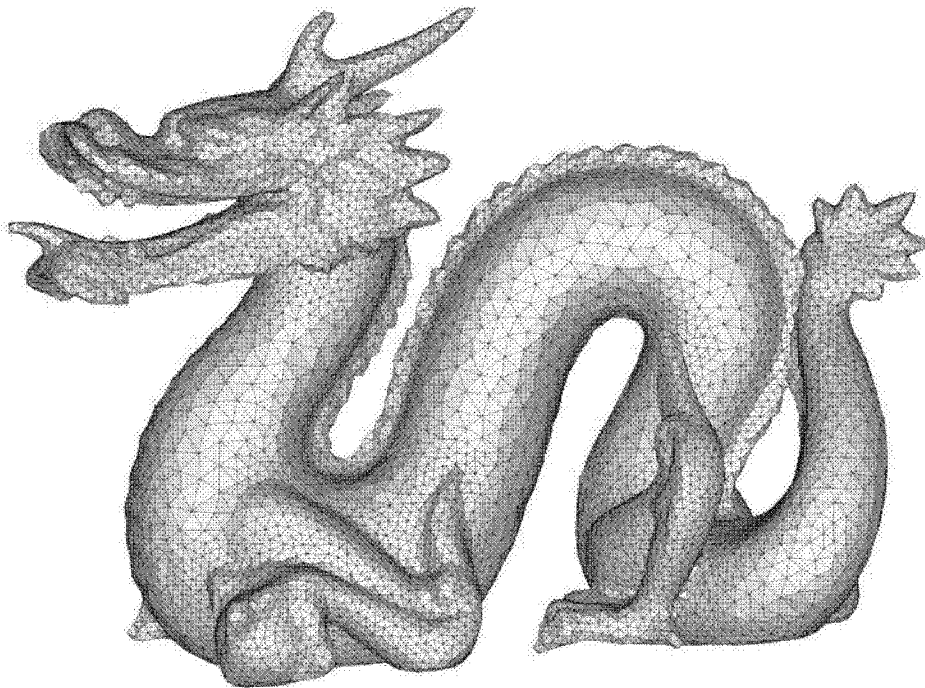


图7

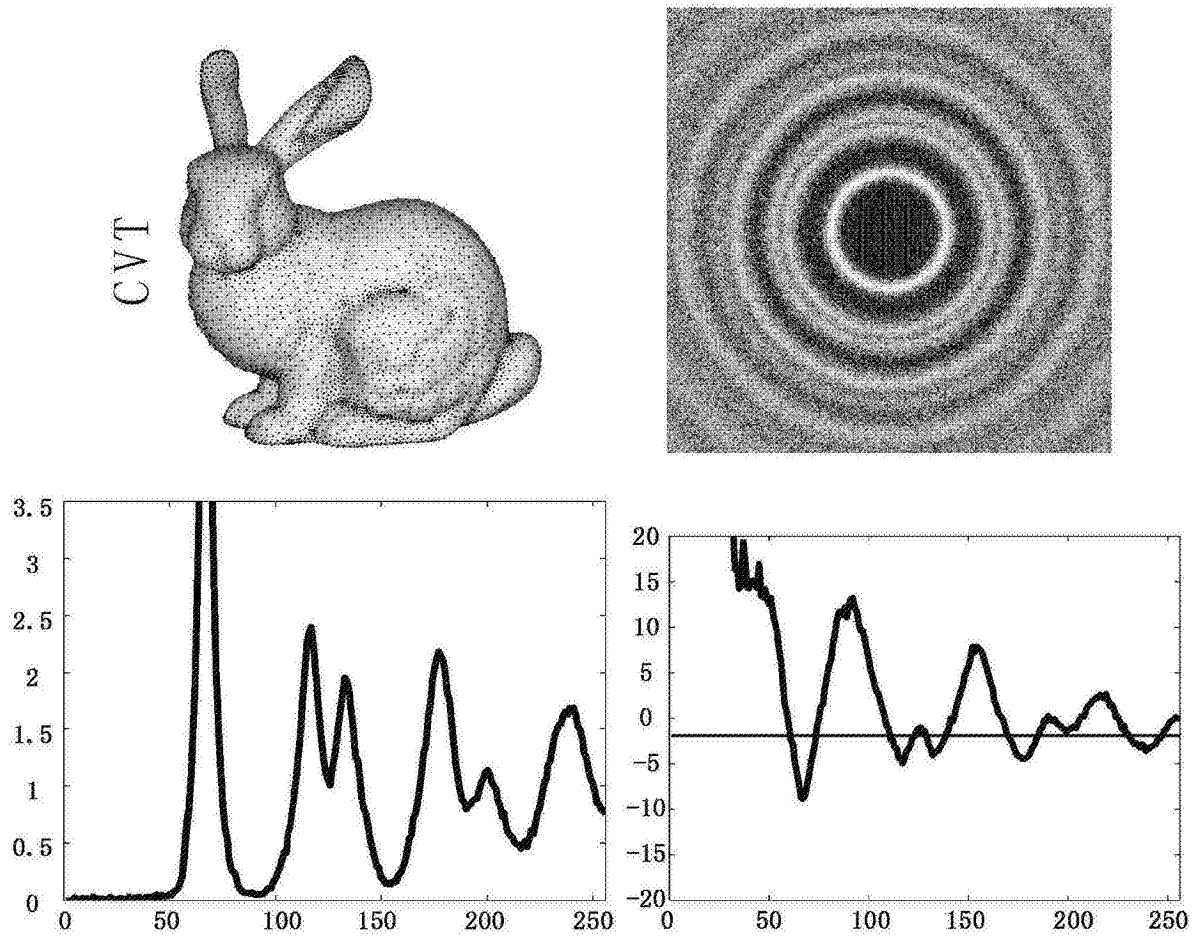


图8A

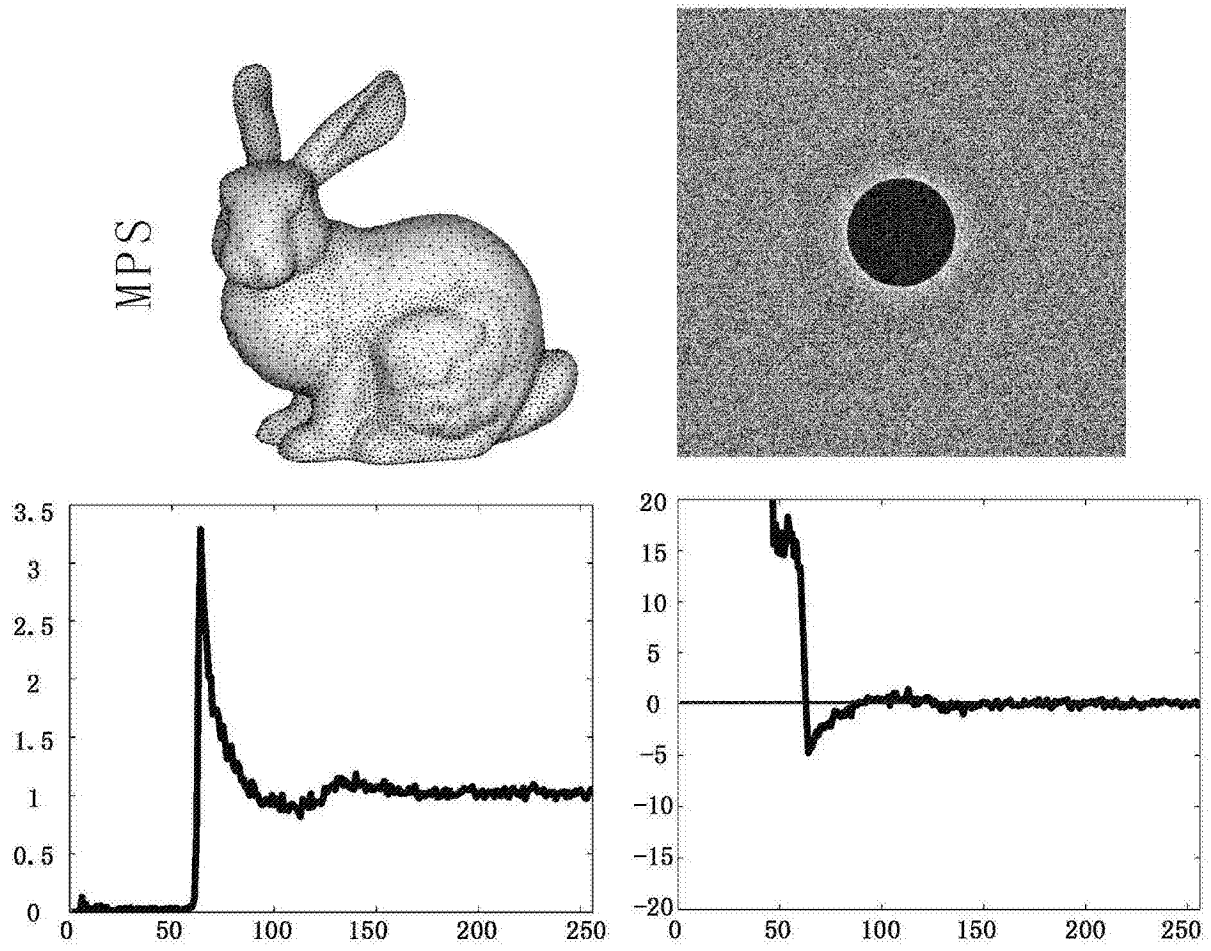


图8B

FPO

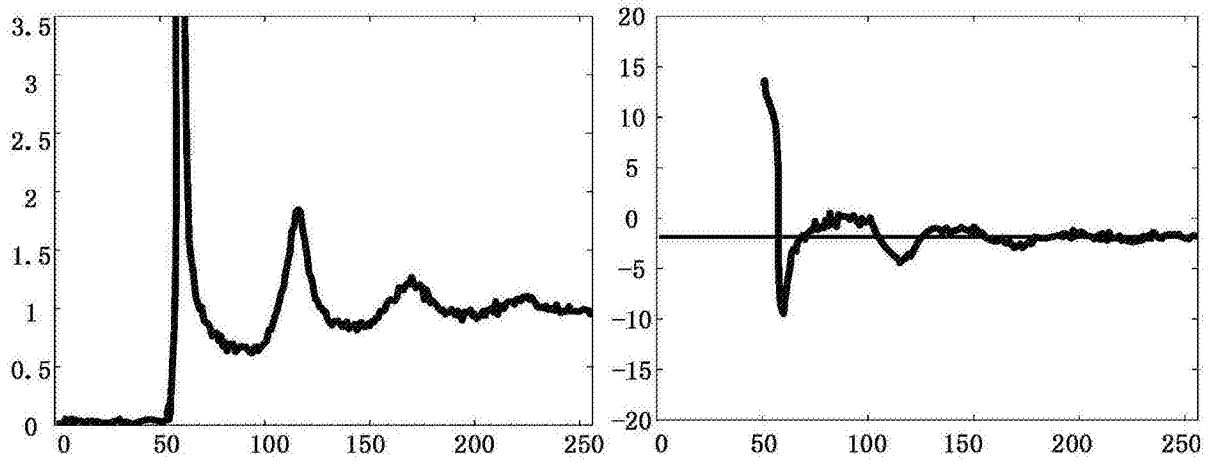
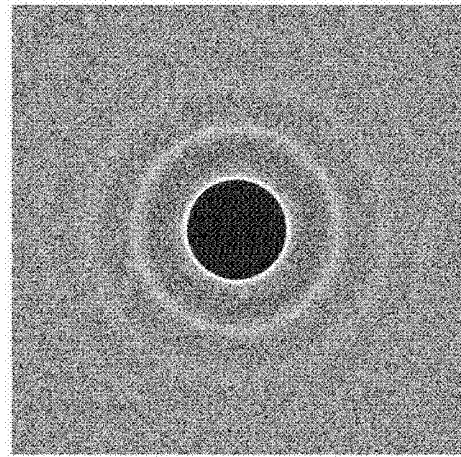
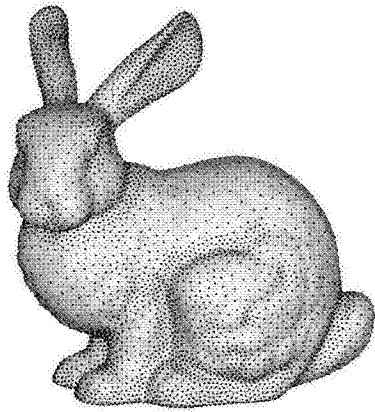


图8C

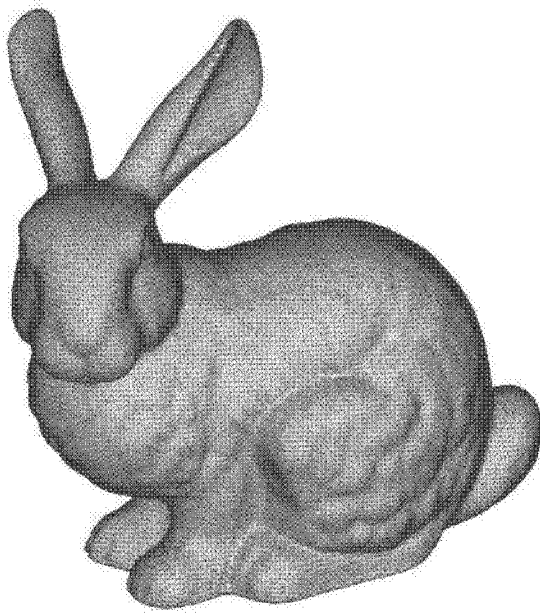


图9A

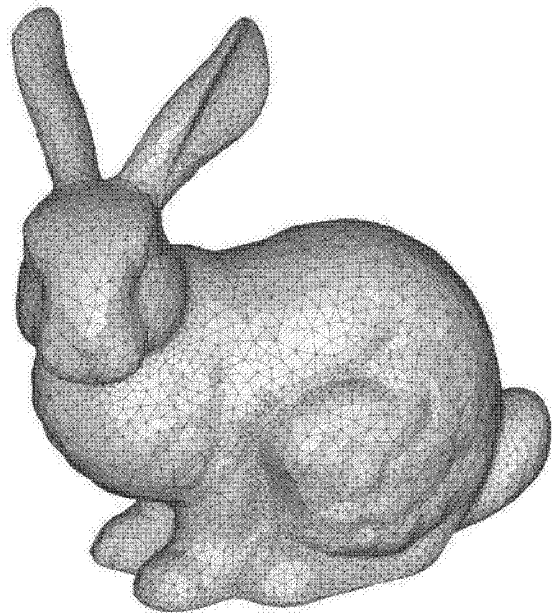


图9B

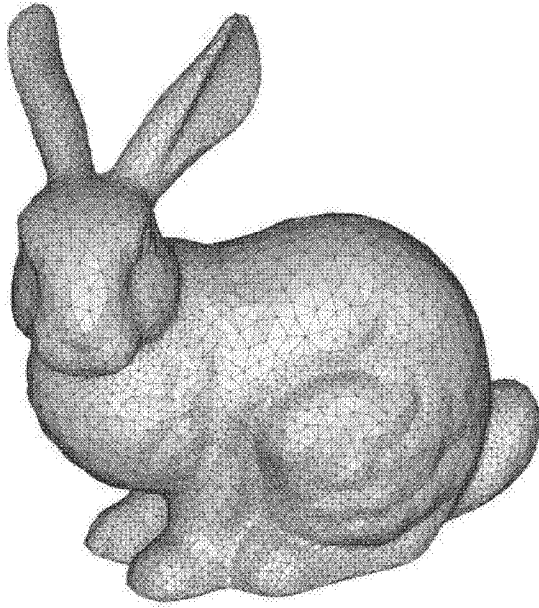


图9C

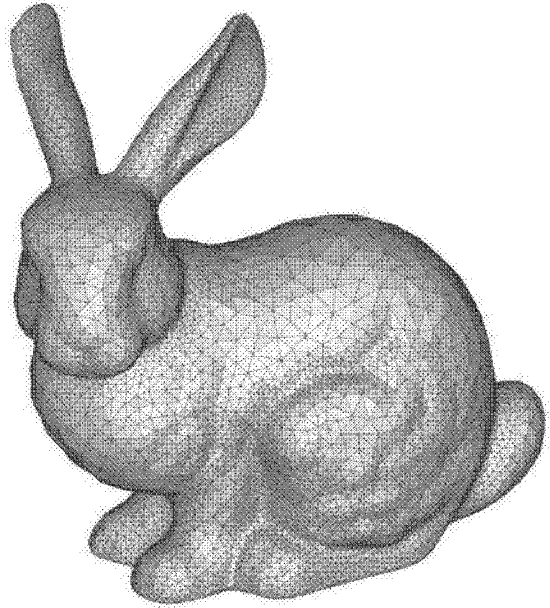


图9D