

# 基于参数空间的混合多分辨率绘制\*

冀俊峰<sup>1,3+</sup>, 李胜<sup>1,3</sup>, 刘学慧<sup>1</sup>, 吴恩华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院 软件研究所 计算机科学重点实验室,北京 100080)

<sup>2</sup>(澳门大学 科技学院 电脑及资讯科学系,澳门)

<sup>3</sup>(中国科学院 研究生院,北京 100039)

## Parameter Space Based Multiresolution Structure for Hybrid Rendering

Ji Jun-Feng<sup>1,3+</sup>, LI Sheng<sup>1,3</sup>, LIU Xue-Hui<sup>1</sup>, WU En-Hua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(Laboratory of Computer Science, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>2</sup>(Department of Computer and Information Science, Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau, China)

<sup>3</sup>(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62562796, E-mail: jjf@ios.ac.cn, <http://www.iscas.ac.cn>

Received 2003-12-29; Accepted 2004-03-17

Ji JF, Li S, Liu XH, Wu EH. Parameter space based multiresolution structure for hybrid rendering. *Journal of Software*, 2004,15(10):1515~1521.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1515.htm>

**Abstract:** In this paper, a novel hybrid multiresolution approach is proposed to efficiently render highly detailed objects based on the respective merits of point-based and polygon-based rendering. Both point and polygon are tightly integrated into the uniform structure of P-Quadtrees, which are constructed from geometry images. While traversing the P-Quadtrees in rendering, the part of surface that faces the viewer can be rendered by coarser quad mesh to reduce the numbers of rendering primitives. The shading details can be enhanced by hardware accelerated normal mapping. The view-dependent LOD (level of detail) selects the finer hierarchy on silhouette, which is rendered by points. The rendering efficiency of large-scale model is greatly improved while the visual effect at both the surfaces and the silhouette is guaranteed.

**Key words:** hybrid rendering; LOD (level of detail); silhouette fidelity; normal mapping; per-pixel lighting

**摘要:** 根据点和多边形在表示和绘制物体上各自不同的特点,提出了一种有效绘制细节高度复杂物体的多分辨率方法.3D表面被映射到参数平面,经规则采样成为几何图像,P-Quadtrees是基于几何图像建立的四叉树多分辨率层次结构.通过对四叉树的遍历,面向视点的表面用较大多边形面片绘制,光照细节通过法向映射完成;轮

---

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60033010, 60173022, 60223005 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312102 (国家重点基础研究发展规划(973)); the Research Grant of University of Macau (澳门大学研究基金)

**作者简介:** 冀俊峰(1967—),男,河北临漳人,博士生,主要研究领域为计算机图形学,数字几何处理与绘制;李胜(1974—),男,博士生,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实技术;刘学慧(1968—),女,博士,副研究员,主要研究领域为计算机图形学;吴恩华(1947—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学.

廓部分通过视点相关的 LOD(level of detail)控制进行细化,使用点来绘制物体复杂精细的轮廓.通过此方法,细节复杂模型的绘制不仅可以被硬件加速,而且无论在表面还是在轮廓部分都能获得很好的视觉效果.

**关键词:** 混合绘制;LOD(level of detail);轮廓保持;法向映射;基于像素光照计算

**中图法分类号:** TP391 **文献标识码:** A

3D 扫描仪已被广泛用于获取细节高度复杂物体的表面模型,其扫描分辨率很高,得到的采样点非常多<sup>[1]</sup>,存储和绘制大规模模型是一项挑战性工作.点绘制(point-based rendering)<sup>[2,3]</sup>直接以采样点作为绘制基本元素,造型灵活,绘制简单,适合于描绘细节复杂的形状轮廓.由于点与点之间没有连接关系,LOD(level of detail)层次的建立和可见性判定简单.但是,点表示数据冗余大,并且缺少专门用于点绘制的硬件加速技术.

另一方面,多边形表示简洁、高效,特别适合于表示变化平缓的平坦表面,且能够充分利用显示硬件加速绘制.法向映射<sup>[4]</sup>可以有效减少绘制的多边形数目,并能表现表面复杂细节的光照效果.利用基于像素的光照计算可在 GPU 上实现加速绘制<sup>[5]</sup>.但法向映射没有改变表面的几何形状,因而轮廓表现能力较差.位移映射<sup>[6]</sup>虽然能够有效绘制物体的轮廓细节,但显示硬件实现困难.

通过结合点和多边形在绘制方面各自的优点,本文提出了一种基于参数空间的点与多边形的混合多分辨率绘制方法.三维表面被参数化和在参数空间规则重采样得到几何图像<sup>[7,8]</sup>,并由此建立基于四叉树的多分辨率结构,我们称之为 P-Quadtrees.四叉树拓扑结构简单,通过视点相关的连续 LOD 可实现轮廓保持.其中面向视点表面可用较粗糙的面片,其复杂光照细节通过法向映射仍可得到很好的表现,以减少绘制复杂性;轮廓部分用点绘制.我们的混合多分辨率绘制方法在绘制速度和图像质量之间能够获得较好的平衡.

## 1 相关工作

点绘制是随着 3D 扫描仪的广泛应用而兴起的绘制技术.Surfels<sup>[2]</sup>是采用八叉树的点表示层次结构,通过滤波获得较高的图像质量.QSplat<sup>[3]</sup>用一个层次包围球组织点数据建立 LOD 树,绘制时根据对绘制速度的要求决定 LOD 树的遍历深度.当叶结点在屏幕上投影较大时,绘制图像可能产生空洞,点和多边形混合绘制能够克服这个问题.Chen 等人<sup>[10]</sup>将 QSplat 的叶结点用三角形网格表示.Cohen 等人<sup>[11]</sup>把多层次点表示和多分辨率网格结合到有向非循环图中.Dey 等人<sup>[12]</sup>用 Voronoi 图对采样点进行局部特征分析,由此建立多分辨率三角形伞,观察距离较远时用点来绘制三角形伞.张严辞等人<sup>[13]</sup>根据深度图像重建场景,其中细节复杂表面用点表示.

点能够灵活表示形状细节复杂的表面,但对于平滑表面也需要大量数据.微分点绘制(differential point)<sup>[14]</sup>应用微分几何计算采样点邻近的局部曲率,能够以较少的点表示平滑表面.但微分点只是利用法向映射表示采样点附近的局部曲率的法向分布,无法表示各种复杂的细节.Tarini 等人<sup>[9]</sup>通过把简化模型表面三角形的法向分布直接映射到参数空间,应用法向细节纹理提高绘制效率.由于使用简化模型,绘制复杂性大大降低.但法向映射没有改变网格的几何形状,因此在轮廓部分很粗糙.

由单个三角形拼接所建立的纹理拼图不利于建立多分辨率结构.为此,网格表面被剖分成一系列和圆盘拓扑同构的 Chart<sup>[8,15]</sup>,通过表面参数化,将 3D 表面映射到 2D 参数平面.几何映射经均匀网格规则采样,称为几何图像(geometry image)<sup>[7,8]</sup>.几何图像是在参数空间的完全规则网格表示,拓扑结构简单,适合于多分辨率绘制.

我们的方法创建了统一的适用于大规模数据模型的多分辨结构进行混合绘制,在点绘制与多边形绘制之间切换更为灵活.我们的多分辨绘制根据几何图像建立基于四叉树的多分辨率结构,结合了点与多边形表示的特点,并适合利用当前 GPU 作进一步光照计算.

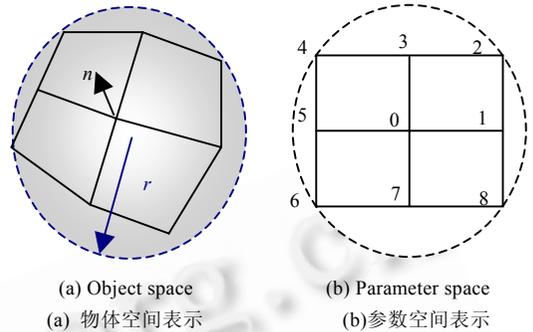
## 2 P-Quadtrees 的结构

P-Quadtrees 建立在几何图像的基础上.几何图像是三维表面在参数空间映射的规则点采样表示,其中每个有效像素对应于一个物体空间采样点坐标,每 4 个相邻像素构成的方形结点对应于物体空间的四边形面片.四叉树是一种管理隐式参数平面上规则数据场的简单而高效的数据结构,其邻接关系简单,容易实现连续 LOD 控

制,因此,我们对几何图像自顶向底不断按四叉树细分建立层次结构,即 P-Quadrees.形状复杂的物体需要被剖分成一系列与圆盘拓扑同构的网格面片,即 Chart,构成多 Chart 几何图像,我们分别对每个 Chart 建立四叉树.

P-Quadrees 结点的数据结构包括子结点指针、顶点属性以及结点的法向和法向锥,另外还有结点的包围球半径和误差.如图 1 所示,P-Quadrees 结点包含 9 个顶点,顶点属性包括几何位置,但没有法向.结点的法向和法向锥用于可见性判断.结点的包围球为了快速估算结点在屏幕上投影的大小,用于决定是用点还是多边形来绘制体素.结点误差包括子结点的误差和各边的误差,用于在 LOD 控制时选择适当的层次.

使用 P-Quadrees 的目的是通过视点相关的连续 LOD 减少绘制体素的数量,并增强显示物体的轮廓.我们用粗糙的多边形绘制面向视点的表面,通过凹凸映射获得较为复杂细节的光照效果,从而减少绘制体素的数量;在轮廓部分用较精细的网格,以获得精确轮廓.



(a) Object space (b) Parameter space  
(a) 物体空间表示 (b) 参数空间表示

Fig.1 Structure of P-Quadtree node

图 1 P-Quadrees 结点结构

### 3 创建 P-Quadrees

从 3D 扫描数据点出发,首先进行 3D 网格重建和简化,并将其剖分.通过参数化和重采样后得到几何图像,经过细节恢复和边界缝合处理,最后建立 P-Quadrees.整个创建过程如图 2 所示.

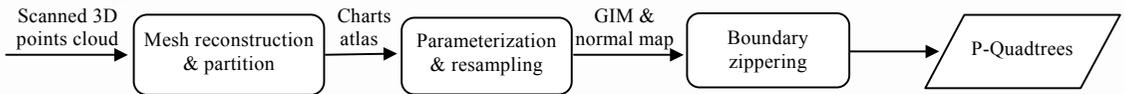


Fig.2 The process to create P-Quadrees

图 2 P-Quadrees 的建立过程

#### 3.1 网格重建及简化

从 3D 扫描仪获得的采样点被重建成为网格.为了保证微小的细节特征,扫描点的密度很高,现有的参数化方法不易于处理.我们的处理方法通过形状保持的网格简化方法,把表面的复杂细节简化掉.在建立几何图像时,对每一像素通过光线跟踪的方法得到原模型表面的几何属性.这样,原模型中的细节可以准确地恢复到几何图像表示中.这样,我们可以有效地处理大规模模型,从而保持物体表面的细微特征.

#### 3.2 建立几何图像和法向纹理

##### 3.2.1 表面剖分

参数化要求被处理的表面拓扑同构于圆盘(disk-like),即表面仅有一条封闭边界.为此,复杂表面需要进行表面剖分,将其分割为一系列圆盘状的 Chart.P-Quadrees 要求 Chart 数目尽可能少,形状接正方形,大小均匀.这样不仅便于参数化,也有利于采样和 LOD 控制.我们对模型进行剖分主要依据其表面特征进行,这些特征包括二阶差分<sup>[15]</sup>、伪直母线(quasi-rulings)<sup>[16]</sup>或者曲率等.

##### 3.2.2 表面参数化及规则重采样

表面参数化把 3D 表面映射到 2D 参数平面.根据微分几何,对于不可展曲面,参数化必然会产生扭曲.不同的方法保持某一方面的扭曲较小以适合不同的应用,其中保角映射或者共形映射(conformal mapping)<sup>[15]</sup>具有局部各向同性的性质,较好地保持了网格的拓扑形状,适用于重新网格化和纹理映射.对于 2D 参数空间(u,v)到 3D 表面(x,y,z)的一个映射  $\chi$ ,如果参数空间点(u,v)的映射  $\chi(u,v)$ 在 3D 表面上的等 u 和等 v 曲线的切线矢量相互正交,并且具有相同的范数,我们称这种映射为共形映射.即满足 Cauchy-Riemann 条件:

$$N(u, v) \times \frac{\partial \chi}{\partial u}(u, v) = \frac{\partial \chi}{\partial v}(u, v) \quad (1)$$

其中  $N(u, v)$  为表面的法矢量。

A. Sheffer 等人<sup>[17]</sup>提出的角度摊平法(angle-based flattening, 简称 ABF)把表面参数化问题作为基于角度的约束优化问题求解。ABF 生成的参数化映射扭曲较小,并且速度较快,更适合我们的方法。

为了构造几何图像,需要用正交规则网格对几何映射重采样。我们的重采样方法采用扫描线转换算法。为了多分辨率绘制,我们选择物体空间的法向纹理,使法向细节独立于模型的表示分辨率。

为了处理大规模模型,参数化和建立几何图像可使用简化模型,但在重采样时需要恢复原模型的表面细节。对于每一几何图像像素(或者法向纹理),沿着其相应的表面法线方向发射射线,找到与原模型表面相交的三角形,通过插值求出新的几何位置和法向,将几何位置保存到几何图像,法向存入法向纹理。

### 3.2.3 边界缝合

Chart 形状为一系列不规则的多边形。由于采样密度和采样方向不同,离散化后在两个相邻的 chart 边界附近会出现明显的裂缝。因此,需要对边界部分作特殊处理,通过缝合来消除裂缝。在遍历四叉树时,对几何图像的边界部分一般要遍历到最底层,边界缝合只需针对几何图像即可。

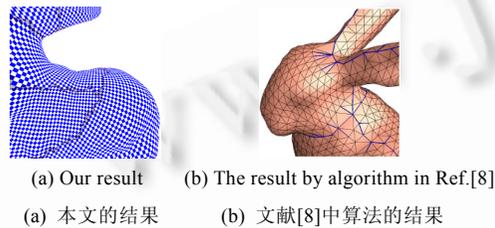


Fig.3 Comparison of zippering algorithms

图3 边界缝合效果比较

由于受几何图像结构的限制,文献[8]的缝合方法是把边界点拉伸到最近的边界像素上。由于 P-Quadtrees 是基于四叉树的多分辨率结构,我们的边界缝合算法可以利用结点细分的特性来减少边界缝合处的几何变形。对于边界穿过的结点,我们通过分别对其细分,根据边界线穿过结点的类型建立子结点。与文献[8]中所提方法相比,我们的算法几何变形较小,但其代价是采样点数量明显增加。图3是我们的缝合算法和文献[8]中方法的比较,由于我们的算法充分利用了四叉树结构,因此网格分布均匀,减少了缝合处几何细节的变形。

### 3.3 P-Quadtrees的建立

四叉树要求数据为  $(2^n+1) \times (2^n+1)$  的规则网格。但几何图像的大小可能不满足该条件,为此,我们扩展几何图像,让其大小尽可能接近  $(2^n+1)$ ,但不对几何缩放图像,扩展部分的像素用空值填充。

P-Quadtrees 以自顶向下的方式递归建立,建立过程包括构造层次结构及计算结点的误差和包围球半径。P-Quadtrees 的结点误差包括子结点误差和各边误差。由于边界结点可能包含空值像素,在计算边界点的误差时,将其误差设为最大误差值,这样,在对其进行 LOD 选择时必须遍历到叶结点,以保证在几何图像边界附近绘制图像的连续性。

## 4 模型绘制

首先通过遍历 P-Quadtrees 获得适当的绘制结点。我们的目标是,在保持物体轮廓的条件下用尽可能少的结点表示模型。为此,在四叉树遍历时对面向视点部分的面片用较大屏幕误差阈值  $\delta$ ,以减少绘制体素的数量;对轮廓部分用比较小的屏幕误差阈值  $\epsilon$ 。对 P-Quadtrees 遍历采用自顶向下按深度优先遍历。对于每一个结点,首先检测结点是否位于轮廓附近<sup>[18]</sup>,以确定是否使用轮廓部分的屏幕误差阈值  $\epsilon$ 。如果结点是叶结点或者其误差小于当前屏幕误差阈值,则绘制该结点,否则继续向下递归遍历。通过控制  $\delta$  和  $\epsilon$ ,我们可以对绘制速度和图像质量之间的平衡进行调节。在四叉树遍历时,当相邻结点为不同层次大小时,在绘制图像中可能会出现裂纹。使用受限四叉树可以消除这种绘制缺陷。

确定需要绘制的结点后,根据结点在屏幕上的投影面积决定使用点还是多边形来绘制。当投影面积大于像素面积时,需要用三角形绘制;若投影面积小于1个像素时,用 OpenGL 点绘制函数直接在屏幕上绘制一个方形

像素点.随即把三角形面片及其顶点光照参数和法向纹理送到 GPU 中进行基于像素的光照计算,由 Register Combiner 或 Pixel Shader 计算像素的光照,绘制出结果图像.

## 5 实验结果及讨论

我们用 VC++和 OpenGL 在 Windows2000 下编程实现了上述混合多分辨率表示和绘制过程.结果测试的运行环境是 800M 的 Pentium 3 PC,128M 内存,32M 显存的 Geforce2 MX 400 显卡.

图 4 说明了使用 P-Quadtrees 的绘制效果.图 4(a)中兔子的后腿部有丰富的细节,但由于这部分表面朝向当前视点,因此只需用很少的三角形绘制,如图 4(b)所示.随着视点的移动,当这部分表面变为轮廓部分时,如果不调整 LOD,绘制的轮廓部分明显粗糙,如图 4(c)所示.当 LOD 选择更新后,轮廓的细节会明显增强,如图 4(d)~图 4(f)所示.

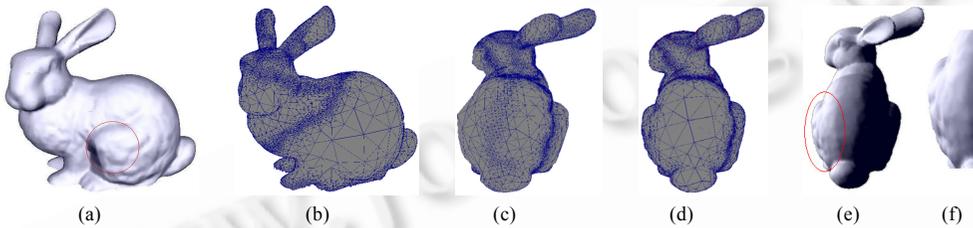


Fig.4 Silhouette fidelity rendering for 'Bunny'

图 4 对 Bunny 轮廓保持绘制效果

图 5(a),图 5(b)给出了点与多边形混合绘制的示意,图中轮廓附近的黑色区域表示用点绘制,网格部分用多边形绘制.图 5(c),图 5(d)为采用不同方法绘制结果的对比.采用以往的算法<sup>[9]</sup>生成结果如图 5(c)的轮廓非常粗糙,而用我们的方法绘制的轮廓则要生动逼真得多,如图 5(d)所示.

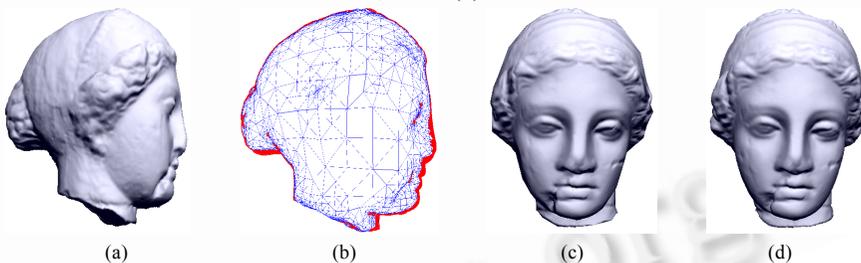


Fig.5 The hybrid rendering of model 'Hygeia'

图 5 对 Hygeia 模型使用混合绘制效果

图 6 是我们的细节的简化和恢复效果.图 6(a)是对简化网格进行处理和绘制的结果,花瓶表面细节已经丢失.图 6(b)和图 6(d)是用我们的细节恢复算法根据原模型得到的结果.可以看到,我们的方法不仅恢复了光照细节,同时也恢复了几何细节.图 6(c)是绘制图 6(a)和图 6(b)使用的多边形网格.

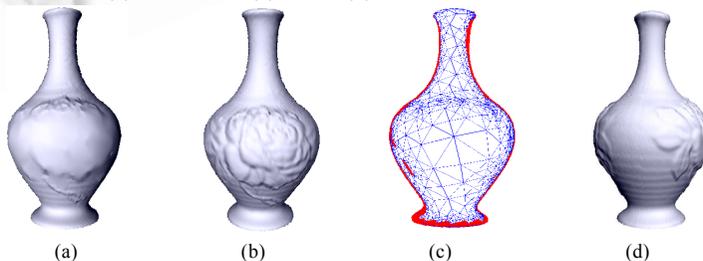


Fig.6 Geometry and shading details recovery

图 6 几何和光照细节的恢复

由于 GPU 针对三角形绘制的优化,Geforce2 MX 400 绘制三角形的速度约为 670k~700k/s,而绘制点的速度

仅为 500k/s.但由于网格中点的数目一般是三角形数目的一半,用点绘制的速度仍然比三角形要快.实验结果表明,使用点可以提高绘制速度.如果采用基于硬件的点绘制加速技术,绘制速度将会进一步提高.

表 1 给出了 P-Quadrees 绘制速度及其与微分点绘制<sup>[14]</sup>的比较.由表 1 可以看到,若几何图像的数目较少,则绘制效率较高.为了与微分点绘制进行比较,我们选择了与其相同的模型和运行环境.微分点绘制使用法向映射绘制曲率的光照效果,点的表示范围较小.而 P-Quadrees 由于使用了细节法向纹理,并使用多分辨率绘制,因此我们的绘制速度比微分点绘制有了很大提高.

**Table 1** Rendering performance of P-Quadrees

表 1 P-Quadrees 的绘制性能及其与微分点绘制的比较

Models	Bunny	Venus
#Charts	9	2
Samples (k)	40	134
Performance of P-Quadrees (fps)	20	13
Performance of differential point rendering (fps)	9.09	2.38

## 6 结 语

P-Quadrees 使用统一的结构把点绘制和多边形绘制结合在一起,充分利用了多边形绘制的硬件加速和点绘制的灵活性.P-Quadrees 拓扑结构简单,LOD 控制灵活,通过视点相关的连续 LOD 把面对视点的表面用尽可能粗糙的多边形网格绘制,大大降低了模型的绘制复杂性,而表面上的复杂细节使用基于硬件的法向映射在 GPU 中实现.LOD 选择对轮廓部分用精细的误差标准,使用点绘制描绘出物体的精细轮廓.

## References:

- [1] Levoy M, Pulli K, Curless B, Rusinkiewicz S, Koller D, Pereira L, Ginzton M, Anderson S, Davis J, Ginsberg J, Shade J, Fulk D. The digital michelangelo project: 3D scanning of large Statues. In: Akeley K, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 131~144.
- [2] Pfister H, Zwicker M, Baar JV. Surfels: Surface elements as rendering primitives. In: Akeley K, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 335~342.
- [3] Rusinkiewicz S, Levoy M. QSplat: A multiresolution point rendering system for large meshes. In: Akeley K, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 343~352.
- [4] Blinn JF. Simulation of wrinkled surfaces. In: Proc. of the SIGGRAPH 1978. New York: ACM Press, 1978. 286~292.
- [5] Kilgard MJ. A practical and robust bump-mapping technique for today's GPUs. In: Proc. of the Game Developers Conf. 2000. <http://www.nvidia.com>
- [6] Cook RL. Shade trees. Computer Graphics, 1984,18(3):223~231.
- [7] GU XF, Gortler SJ, Hoppe H. Geometry images. In: Appolloni T, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2002. New York: ACM Press, 2002. 355~361.
- [8] Sander PV, Wood ZJ, Gortler SJ, Snyder J, Hoppe H. Multi-Chart geometry images. In: Proc. of the Eurographics Symp. on Geometry Processing. 2003. 146~155.
- [9] Tarini M, Cignoni P, Rocchini C, Scopigno R. Real time, accurate, multi-featured rendering of bump mapped surfaces. Computer Graphics Forum, 2000,19(3):119~130.
- [10] Chen B, Nguyen MX. POP: A hybrid point and polygon rendering system for large data. In: Ertl T, ed. Proc. of the IEEE Visualization 2001. San Diego: IEEE Computer Society, 2001. 45~52.
- [11] Cohen JD, Aliaga D, Zhang W. Hybrid simplification: Combining multi-resolution polygon and point rendering. In: Ertl T, ed. Proc. of the IEEE Visualization 2001. San Diego: IEEE Computer Society, 2001. 37~44.
- [12] Dey TK, Hudson J. PMR: Point to mesh rendering, a feature-based approach. In: Proc. of the IEEE of Visualization 2002. Boston: IEEE Computer Society, 2002. 155~162.
- [13] Zhang YC, Liu XH, Wu EH. A hybrid representation of environment models in image-based real time walkthrough. In: Coquillart S, ed. Proc. of the 10th Pacific Conf. on Computer Graphics and Applications 2002. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2002. 325~335.

