

扩展的向量辐射度计算方法^{*}

孙元浩 龚震宇 潘金贵

(南京大学软件新技术国家重点实验室 南京大学多媒体计算研究所 南京210093)

Extended Vector-Based Radiosity

SUN Yuan-Hao GONG Zhen-Yu PAN Jin-Gui

(State Key Laboratory of Novel Software Technology in Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract An algorithm is introduced which extends vector-based radiosity to be suitable for volume clusters. In this algorithm, the powers and surface areas of volume cluster are represented by vectors, which are used in a modified formula to compute the transferred light between volume clusters. This algorithm can utilize virtues of vector-based radiosity, without introducing complex hierarchy construction problem. And it is easy to be implemented in Object-Oriented paradigm.

Keywords Hierarchical radiosity, Vector-based radiosity, Face cluster, Volume cluster

0. 引言

真实感图形绘制算法在游戏场景和建筑效果图的绘制方面得到了广泛的应用。特别是辐射度算法能够生成逼真的明暗变化和颜色辉映效果,因而备受青睐。例如网络对战游戏Quake中的场景就是先经过辐射度算法处理后得到其中每个顶点的颜色,然后与其他纹理图案调制(Modulate)组合成最后的逼真效果的。由于经典的辐射度算法所需的计算量很大,因而许多学者在算法的计算效率上做了很多改进工作。例如传统层次辐射度算法把多边形聚集成簇(Cluster),作为一个整体来辐射和接收光能,从而降低算法复杂度^[2~4]。最近提出的面簇(Face Cluster)方法^[1]则是把若干多边形聚集成一个面簇。为了减小面簇中多边形法线方向之间的差异,算法在初始化时利用改进后的面数削减算法(Surface Simplification)构造出一棵层次树,使得法线方向相近的多边形聚集在一起作为层次树的节点。面簇方法同时引入向量辐射度的方法,即用向量来表示面簇的辐射功率以及辐射的光能。通常功率和能量是没有方向的,但在辐射度算法中,用向量来表示面簇的辐射功率可以很巧妙地体现面簇向各个方向辐射的不均匀性;同时借向量来表示节点间辐射的光能,在计算面簇的入射辐射度时就可以根据多边形的法线方向来调整每个多边形接收的辐射度,而不像传统层次辐射度方法那样每个多边形都接收相同的入射辐射度。面簇方法至此可以说是完美的,可是在构造层次树时,不可避免地需要生成体簇(Volume Cluster),这些体簇中的多边形法向可能朝向任何方向,因而差异很大。如果采用面簇方法中单一的辐射功率向量来表示体簇的辐射功率的话,会遗漏其他方向(特别是相反方向)上的辐射功率。由于体簇在层次辐射度方法中是普遍存在的,而且数量很多,因此有必要设计新的方法来计算它们之间的光能辐射,同时又能保留向量辐射

度方法的优点。

本文随后部分首先给出辐射度计算的基本公式,然后将向量辐射度方法推广到体簇上,推导出了体簇辐射功率的向量表示方法以及计算体簇之间辐射光能和辐射度的新方法,同时给出了这个方法的理论依据。最后简要描述了实现方案。

1. 基本公式

已知面片 j 辐射到面片 i 的光通量¹可以用如下公式计算^[1~3]:

$$\Delta\Phi_{ji} = \frac{B_j(\vec{S}_j \cdot \vec{r}_{ji}) + (\vec{S}_i \cdot \vec{r}_{ij}) + V(j, i)}{\pi(\vec{r}_{ij} \cdot \vec{r}_{ij})^2} \quad (1)$$

其中 B_j 是微面元 j 的辐射度, $\vec{S}_j$ 为面片 j 的面积向量; $\vec{r}_{ji}$ 是从微面元 j 中心到微面元 i 中心的距离向量,反之, $\vec{r}_{ij}$ 是 i 到 j 的距离向量; $V(j, i)$ 是微面元 j 和 i 之间的遮挡函数²; $(x)_+$ 运算结果是正数($x > 0$)或者零($x \leq 0$)。这个公式事实上是用来计算两个微面元之间的辐射的,由于辐射度算法往往将多边形分割成细小的面片,因而在误差允许的范围内,通常直接使用(1)式来计算面片之间辐射的光能。

对簇而言,不论是辐射节点(s)还是接收节点(r),均含有多个多边形面片,因此簇之间辐射的光通量为:

$$\Phi_{sr} = \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{B_j(\vec{S}_j \cdot \vec{r}_{ji}) + (\vec{S}_i \cdot \vec{r}_{ij}) + V(j, i)}{\pi(\vec{r}_{ij} \cdot \vec{r}_{ij})^2} \quad (2)$$

这个公式的复杂度就是 $O(m \times n)$,其中 m 是辐射节点中面片的个数, n 为接收节点中面片的个数。

为了减少计算量,通常将(2)式分解成两部分^[2,3],并假设距离向量 $\vec{r}_{ji}$ 和 $V(j, i)$ 固定不变,分别记为 $\vec{r}$ 和 $V(s, r)$,这样得到:

$$\Phi_{sr} \approx \frac{\sum_{j=0}^{m-1} B_j(\vec{S}_j \cdot \vec{r}) + \sum_{i=0}^{n-1} (-\vec{r} \cdot \vec{S}_i)_+ + V(s, r)}{\pi(\vec{r} \cdot \vec{r})^2} \quad (3)$$

^{*}得到日本富士通株式会社的研究基金资助。孙元浩 硕士研究生,主要研究方向为真实感渲染算法。龚震宇 硕士研究生,主要研究方向为真实感渲染算法。潘金贵 教授,博士生导师,主要研究领域为多媒体计算,计算机图形学。

1 由于我们关注的是单位时间内传递的能量,因而本文中光通量、功率和能量交替使用,这三个词的单位都是瓦特。

2 由于篇幅所限,本文不讨论 $V(j, i)$ 的计算方法,该方法已经比较成熟,参考文[2,3,4]。

也就是先遍历辐射簇中的面片,计算它们的辐射功率的总和,然后遍历接收簇中的面片,计算它们在辐射方向 $\vec{r}$ 上的投影面积。这样复杂度就降为 $O(m+n)$,当然这是以牺牲计算精度为代价的。

在面簇方法中,将簇看成是一个多边形面片参与辐射与接收。每个簇有自身的辐射功率,这个辐射功率是将簇中每个面片的辐射功率累加起来的,并用面片的法线作为累加时的权重^[1],即:

$$\vec{P}_i = \sum_{j=0}^{m-1} B_j \vec{S}_j$$

这里 $B_j \vec{S}_j$ 之间的加法是矢量加法。可以看出这个方法需要每个面片的 $\vec{S}_j$ 方向相对一致,否则矢量和的结果会导致相反方向的 $B_j \vec{S}_j$ 互相抵消。

同样,令 $\vec{S}_r = \sum_{i=0}^{n-1} \vec{S}_i$,这样面簇算法中光通量的计算公式就变成:

$$\Phi_r \approx \frac{(\vec{P}_i \cdot \vec{r})_+ * (-\vec{r} \cdot \vec{S}_r)_+ * V(s, r)}{\pi(\vec{r} \cdot \vec{r})^2} \quad (4)$$

2. 体簇之间的辐射

2.1 体簇与包围盒

既然可以把面簇的辐射效果类比为多边形面片,用类似多边形辐射度的表示方法来表示面簇的辐射特征,那么对体簇而言,也可以将其类比为其他简单的几何体,并用同样的方法来表示体簇的辐射特征。这些简单的几何体可以包括四面体、六面体(长方体)和球等。由于在计算机图形学中经常使用包围盒(bounding box)来表示对象集合的几何范围,因此包围盒可以作为一个合适的候选几何体。与其他几何形状相比,采用包围盒(长方体)有三个优点:

(1) 包围盒的表示简单方便;又比其他的简单几何形状更能紧密包围内部的对象,这正好符合层次辐射度算法对簇的要求^[6]。

(2) 计算机图形学中普遍使用包围盒来表示对象集合的空间范围,并且有许多成熟的算法来生成对象集合的包围盒。

(3) 已有许多适合层次辐射度算法的包围盒层次树的构造方法^[5],而面簇方法需要首先进行面数削减^[1],这类算法相当慢。相对而言包围盒层次树的构造方法要快得多。

基于以上的考虑,把体簇近似为它的包围盒比较合适。直观的想法是把体簇在它的包围盒的六个表面法向上的辐射功率近似看作是包围盒在六个方向上的辐射功率,把体簇在这六个方向上的接收辐射的面积看作是包围盒在这六个方向上的接收面积。这样就可以避免面簇只记录一个辐射方向的缺点,又可以表示体簇在不同方向上辐射功率的不均匀性。剩下的问题就是如何具体计算辐射功率和接收面积,以及这个计算方法的理论依据是什么。

2.2 计算方法

已知一个向量可以分解为它在三维坐标轴上的投影的矢量和。为了与包围盒的六个表面相对应,可以把一个向量分解成六个分量。考虑单个多边形面片,它的面积向量可以分解为:

$$\vec{S}_j = \sum_{k=0}^5 [(\vec{S}_j \cdot \vec{d}_k)_+ \vec{d}_k] \quad (5)$$

其中 $\vec{d}_k$ 是单位向量,且是该面片所属包围盒的六个表面法线向量之一。为方便书写,记 $\vec{A}_{jk} = (\vec{S}_j \cdot \vec{d}_k)_+ \vec{d}_k$ 。根据辐射功率的定义,面片的辐射功率就可以表示为:

$$\vec{P}_j = B_j \vec{S}_j = \sum_{k=0}^5 B_j \vec{A}_{jk} = \sum_{k=0}^5 \vec{P}_{jk} \quad (6)$$

其中 $\vec{P}_{jk} = B_j \vec{A}_{jk}$ 。设作为发射节点的体簇 s 含有 m 个面片,作为接收节点的体簇 r 含有 n 个面片。利用式(3),记两个簇之间辐射的能量为:

$$\Phi_r = \frac{\Phi_s \cdot \Phi_r \cdot V(s, r)}{\pi(\vec{r} \cdot \vec{r})^2}$$

其中 Φ_s 和 Φ_r 分别是与发射节点和接收节点相关的项,即:

$$\Phi_s = \sum_{j=0}^{m-1} B_j (\vec{S}_j \cdot \vec{r})_+ \quad \text{和} \quad \Phi_r = \sum_{i=0}^{n-1} (-\vec{r} \cdot \vec{S}_i)_+$$

首先考虑发射节点,利用式(6),可以得到: $\Phi_s = \sum_{j=0}^{m-1} (\vec{P}_j \cdot \vec{r})_+ = \sum_{j=0}^{m-1} (\vec{r} \cdot \sum_{k=0}^5 \vec{P}_{jk})_+$,又因为 $(\sum x)_+ \leq \sum (x)_+$ (证明从略),所以 $\Phi_s \leq \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{k=0}^5 (\vec{r} \cdot \vec{P}_{jk})_+ = \sum_{k=0}^5 \sum_{j=0}^{m-1} (\vec{r} \cdot \vec{P}_{jk})_+$ 。因为 $\vec{P}_{jk} (j=0 \dots m-1)$ 都与 $\vec{d}_k$ 的方向相同,因此 $\vec{r} \cdot \vec{P}_{jk} (j=0 \dots m-1)$ 的正负符号也相同,所以

$$\Phi_s \leq \sum_{k=0}^5 (\sum_{j=0}^{m-1} (\vec{r} \cdot \vec{P}_{jk}))_+ = \sum_{k=0}^5 (\vec{r} \cdot \sum_{j=0}^{m-1} \vec{P}_{jk})_+$$

可以记 $\vec{P}_{jk} = \sum_{j=0}^{m-1} \vec{P}_{jk}$ (7)

那么: $\Phi_s \approx \sum_{k=0}^5 (\vec{r} \cdot \vec{P}_{jk})_+^2$ (8)

由于 Φ_s 是体簇在 $\vec{r}$ 方向上的辐射功率,式(8)表明它可以通过 $\vec{P}_{jk}$ 来计算得到。而根据式(7), $\vec{P}_{jk}$ 是体簇中所有面片在它的包围盒表面法线 $\vec{d}_k$ 方向上的辐射功率之和,因此可以用 $\vec{P}_{jk} (k=0 \dots 5)$ 来表示体簇在六个方向上的辐射功率。由此得到了体簇的辐射功率的表示方法及其计算依据。

其次考虑接收节点,利用式(5),可以得到: $\Phi_r = \sum_{i=0}^{n-1} (\sum_{k=0}^5 (-\vec{r} \cdot \vec{A}_{ik})_+)$,同样因为 $(\sum x)_+ \leq \sum (x)_+$,可以得到:

$$\Phi_r \leq \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{k=0}^5 (-\vec{r} \cdot \vec{A}_{ik})_+ = \sum_{k=0}^5 \sum_{i=0}^{n-1} (-\vec{r} \cdot \vec{A}_{ik})_+$$

又由于 $\vec{A}_{ik}$ 的方向与接收簇的包围盒的表面法线 $\vec{d}_k$ 相同,因此 Φ_r 进一步简化为:

$$\Phi_r \leq \sum_{k=0}^5 (-\vec{r} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \vec{A}_{ik})_+$$

这时若记 $\vec{A}_{jk} = \sum_{i=0}^{n-1} \vec{A}_{ik}$ (9)

则: $\Phi_r \approx \sum_{k=0}^5 (-\vec{r} \cdot \vec{A}_{jk})_+^2$ (10)

由于 Φ_r 表示体簇在 $\vec{r}$ 方向上接收辐射的面积,而且可以通过 $\vec{A}_{jk}$ 计算得到,因此可以用 $\vec{A}_{jk}$ 来表示体簇在六个方向上的接收面积,计算方法如式(9)。

综合式(8)和(10),就得到了两个体簇之间辐射的光通量为:

$$\Phi_r \approx \frac{\sum_{k=0}^5 (\vec{r} \cdot \vec{P}_{jk})_+ \cdot \sum_{k=0}^5 (-\vec{r} \cdot \vec{A}_{jk})_+ \cdot V(s, r)}{\pi(\vec{r} \cdot \vec{r})^2} \quad (11)$$

3 本文仅计算 Φ_s 的上界,并把上界作为 Φ_s 的近似值,对 Φ_r 也做同样的处理。

其中 $\bar{P}_{ik}$ 和 $\bar{A}_{ik}$ 可以在层次辐射度算法初始化时预先计算得到, 或者在算法一次迭代结束后重新进行一次计算得到。

经过同样的推导, 还可以得到体集簇辐射到面片的光通量:

$$\Phi_{ri} \approx \frac{\sum_{k=0}^5 (\bar{r} \cdot \bar{P}_{ik})_+ \cdot (-\bar{r} \cdot \bar{S}_i)_+ \cdot V(s, i)}{\pi(\bar{r} \cdot \bar{r})^2} \quad (12)$$

以及面片辐射到体集簇的光通量:

$$\Phi_{jr} \approx \frac{(\bar{r} \cdot \bar{P}_j)_+ \cdot \sum_{k=0}^5 (-\bar{r} \cdot \bar{A}_{ik})_+ \cdot V(j, r)}{\pi(\bar{r} \cdot \bar{r})^2} \quad (13)$$

在层次辐射度算法中, Φ_{ri} 可以被用作节点间传递光能的估算值, 以此来决定是否需要细分(subdivide)发射或(和)接收节点。

3. 体集簇与向量辐射度

前面已经分析了体集簇辐射功率的向量表示方法和体集簇间辐射光能的估算方法, 下面接着讨论辐射能量的向量表示方法。

对于作为接收节点的体集簇 r 而言, 其内部的面片 i 接收到的光通量可以通过式(12)来计算。那么根据辐射度的定义, 这个面片接收到的辐射度就是上述光通量除以面片的面积, 即:

$$B_{ri} = \frac{\Phi_{ri}}{\|\bar{S}_i\|} = \frac{\sum_{k=0}^5 (\bar{r} \cdot \bar{P}_{ik})_+ \cdot (-\bar{r} \cdot \bar{n}_i)_+ \cdot V(s, r)}{\pi(\bar{r} \cdot \bar{r})^2}$$

其中 $\bar{n}_i$ 是面片 i 的法线(单位向量)。如果记

$$\bar{R}_r = \frac{\sum_{k=0}^5 (\bar{r} \cdot \bar{P}_{ik})_+ \cdot V(s, r)}{\pi(\bar{r} \cdot \bar{r})^2} \cdot \bar{r} \quad (14)$$

代入上式, 那么面片 i 接收到的辐射度就是:

$$B_{ri} = (-\bar{R}_r \cdot \bar{n}_i)_+ \quad (15)$$

这样, 对体集簇 r 中的每一个面片, 它接收到的辐射度就可以通过式(15)来计算, 而式(14)只需要计算一次。因此, $\bar{R}_r$ 可以作为所谓的“向量辐射度”(单位与辐射度相同), 它的方向用来表示体集簇 s 到体集簇 r 的辐射“方向”, 并且它的值可以被重用且直接应用(式(15))到不同面片上, 从而更能反映面片朝向的不同对辐射度的影响。

$\bar{R}_r$ 的概念并不局限于体集簇。如果发射节点是面片, 那么经过上述同样的推导可以得到:

$$\bar{R}_r = \frac{(\bar{r} \cdot \bar{P}_j)_+ \cdot V(s, r)}{\pi(\bar{r} \cdot \bar{r})^2} \cdot \bar{r}$$

当一个体集簇 r 接收到来自多个发射节点的辐射时, 有两种选择: 一是将每个发射节点的“向量辐射度” $\bar{R}_r$ 利用式(15)立即下推到每个面片上, 从而得到每个面片的辐射度; 二是将多个方向上的 $\bar{R}_r$ 组合成一个统一的表示形式, 并在今后的计算中再下推到面片上, 这种方式可以减少计算量。如果把体集簇看成是它的包围盒, 组合的方法就可以立即得出。包围盒的每个表面接收的辐射度可以用式(14)和(15)计算, 只需要用法线 $\bar{d}_k$ 代替 $\bar{n}_i$ 。例如第 k 个表面接收的辐射度为:

$$\bar{R}_k = (-\bar{d}_k) \cdot \sum_i (-\bar{R}_r \cdot \bar{d}_k)_+ \quad (k \in [0..5])$$

$\bar{R}_k$ 的方向与表面 k 的法线方向相反。这样, 每个体集簇需要记录六个方向上接收的辐射度, 如果要把这些辐射度下推到面片上, 只需要采用式(15)同样的方法, 不过是用 $\bar{R}_k$ 代替 $\bar{R}_r$ 。

4. 实现方案

如前所述, 算法中的节点分为体集簇(Cluster)和面片(Patch)两类。对于体集簇, 在初始化时利用式(7)和式(9)计算得到它的辐射功率 $\bar{P}_{ik}$ 和接收面积 $\bar{A}_{ik}$ ($k=0..5$)。另设抽象的节点基类(Node), 包括两个函数: double ProjectPower(Vector& r) 和 double ProjectArea(Vector& r), 分别用于计算 Φ_i 和 Φ_r 。集簇类和面片类继承节点类的这两个函数, 并分别提供不同的实现。

同时设置一个类, 称为 Link, 表示发射节点(pSource)与接收节点(pReceiver)之间的辐射关系。该类包括两个函数, 分别用来计算节点间辐射的能量以及节点接收的辐射度。这两个函数为:

```
double EstimateEnergy();
Vector ComputeIrradiance();
```

在 EstimateEnergy 函数中, 首先在发射节点和接收节点各取 p 个采样点, 形成 p 个采样距离向量 $\bar{r}_i$ ($i=0..p-1$)。对每个 $\bar{r}_i$ 计算 Φ_{ri} , 分别用 pSource->ProjectPower($\bar{r}_i$) 和 pReceiver->ProjectArea($\bar{r}_i$) 代替 Φ_i 和 Φ_r 。然后从中找出 Φ_{ri} 的最大最小值, 并返回这两个值之间的差, 作为进一步细分节点的依据。

在 ComputeIrradiance 函数中, 则只取发射和接收两个节点的中心点的距离向量作为 $\bar{r}$, 并利用 pSource->ProjectPower($\bar{r}$) 计算 $\bar{R}_r$ (式(14))。

整个算法的其他类和流程已超出本文的讨论范围, 这里不再陈述。

输入三角形数	1022	8 621	42 879
已用时间(秒)	61	66	115

图1 运行环境: CPU P4 1.5GHz, Memory 256MB, Win2000

结论 本文将向量辐射度方法推广到了体集簇上, 推导出了针对体集簇的辐射度表示和计算方法。在此基础上已初

步实现了原型, 用新算法生成的场景图像见图1, 初步的实验

(下转第78页)

建失败。另外如何确定代价函数中各项的平衡关系也是涉及最终结果的重要因素。因此我们将继续予以进一步的验证分析。

结束语 在应用 Markov 随机场和 Bayesian 理论开展的脑磁源成像研究的文献中,Phillips 等^[6]采用的 Markov 模型包含双变量的表征方法:一个二进制的活动过程决定在网格上的偶极子的偶极矩是否为非零值,另一个高斯过程来表示偶极矩强度的变化过程。Chipman 等^[13]在证实了上述模型的可行性后,把该模型进行了略微的改动,扩展为盲点源恢复(blind point source restoration),因为脑内的神经活动的电流偶极子分布的图像类似于天文上星星的分布场一样,是稀疏的点状的。它除去用于指示偶极子存在的二进制 Markov 随机场的 Gibbs 概率分布函数中的聚集项,只保留稀疏项,前提是已经得到了模糊的图像。而本文提出的方法是把图像重建和恢复领域中的线过程概念引入到脑磁求逆过程中,以此来构架目标函数。而且文中从随机正则理论的角度出发,给出了较为详细的此类方法的脑磁源重建理论框架。

此外,基于 MEG 的脑磁源成像是脑功能成像,需要利用脑结构数据和其它已知信息,也就是由 MRI 等其它脑功能成像技术来提供清晰的脑内神经结构解剖图,来配准脑磁逆解提供的功能信息。这需建立在真实头模型基础上开展工作,所以我们的下一步工作将开展基于真实头模型的实际脑磁数据的逆问题研究。

参考文献

- 1 Wang J Z. MNLS inverse discriminates between neuronal activity on opposite walls of a simulated sulcus of the brain. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1994, 41(5): 470~479
- 2 Matsuura K, Okabe Y. Selective minimum-norm solution of the biomagnetic inverse problem. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1995,

42(6): 608~615

- 3 Pascual-Marqui R D. Reply to comments by Hamalainen, Ilmoie-mi, Nunezul. *ISBET Newsletter*, W. Skrandies, 1994(5): 16~21
- 4 Gorodnitsky I F, George J S, Rao B D. Neuromagnetic source imaging with FOCUSS: a recursive weighted minimum norm algorithm. *Elec. clin. neuro.*, 1995, 95: 231~251
- 5 Huang M, Aaron R, Shiffman C A. Maximum entropy method for magnetoencephalography. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1997, 44(1): 98~102
- 6 Phillips J W, Leahy R M, Mosher J C. MEG-based imaging of focal neuronal current sources. *IEEE Trans. Med. Imag.*, 1997, 16(3): 338~348
- 7 Baillet S, Garnero L. A Bayesian approach to introducing anatomofunctional priors in the EEG/MEG inverse problem. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1997, 44(5): 374~385
- 8 Hasson R, Switthenby S J. A Bayesian test for the appropriateness of a model in the biomagnetic inverse problem. *Inver. Prob.*, 1999, 15: 1439~1454
- 9 Nicolaos B K, Anastasios N V. Regularization theory in image restoration-the stabilizing functional approach. *IEEE Trans. Acou. Spee. Sig. Pro.*, 1990, 38(7): 1155~1179
- 10 Geman S, Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1984, 6: 721~741
- 11 Morris R D. Image sequence restoration using Gibbs distributions: [Ph. D. thesis]. Trinity College
- 12 Wang J, Wang Y, Chi Z. Continuous Reconstruction of Density Image from Compton Scattered Energy Spectra with Neural Network. *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.*, 1999, 146: 235~239
- 13 Chipman B A, Jeffs B D. Blind multiframe point source image restoration using MAP estimation. In: *Proc IEEE*, 1999. 1267~1270

(上接第69页)

结果显示新算法速度较快(4万多个三角形的渲染只需115秒),产生的图像也很逼真。下一步需要深入进行新算法的误差分析,并将镜面反射的计算也引入到新算法的计算框架内。目前该软件原型已作为富士通株式会社 ImageRender 软件的渲染模块,正在进行用户测试。

参考文献

- 1 Willmott A J, et al. Face cluster radiosity. In: *Proc. of the Tenth Eurographics Workshop on Rendering*, Springer-Verlag / Wien, 1999. 293~304
- 2 Stamminger M, et al. Bounded clustering - finding good bounds on

clustered light transport. In: *Conf. Proc. of Pacific Graphics '98*, 1998

- 3 Smits B, et al. A clustering algorithm for radiosity in complex environments. In: *Proc. of SIGGRAPH '94, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, p435~442
- 4 Sillion F X, et al. A unified hierarchical algorithm for global illumination with scattering volumes and object clusters. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1995, 1(3): 240~254
- 5 Muller G, et al. Automatic Creation of Object Hierarchies for Radiosity Clustering. Technical University of Braunschweig, 2000
- 6 Hasenfratz J-M, et al. A Practical Analysis of Clustering Strategies for Hierarchical Radiosity. *EUROGRAPHICS '99*