

文章编号: 1009-038X(2000)06-0631-05

# 体层次迭代发射算法研究

顾耀林

(无锡轻工大学信息与控制工程学院, 江苏无锡 214036)

**摘要:** 介绍体层次迭代发射算法, 它用于虚拟现实图形演示的体放射法. 基于体单元对光线的发射、吸收、漫射、反射和散射基础上的体放射法, 适用于复杂景物的生成和演示, 在真实感图形演示中具有重要地位. 本文首先介绍体放射法的主要技术细节, 如光线计算, 体放射方程, 光线生成参数, 接着说明体层次发射算法的机理, 最后给出了本算法生成的实例. 同时对算法做了评估.

**关键词:** 体层次迭代; 体放射法; 虚拟现实; 体单元

中图分类号: TP391

文献标识码: A

## Research of Hierarchical Iterative Shooting Algorithm for Volumetric Radiosity

GU Yao-lin

(School of Information and Control Engineering, Wuxi University of Light Industry, Wuxi 214036)

**Abstract:** This paper introduces the hierarchical iterative shooting algorithm, which has been used for volumetric radiosity in virtual reality rendering. Based on the emission, absorption, diffusion, reflection and scatteration of light by a voxel, it is suitable for generating and rendering realistic images of complex scenes. It plays an important role in virtual reality graphics. First of all, the main concept of volumetric radiosity was briefly introduced. This method contains calculation of intensity, radiosity equations and form factors. Secondly, the principle of the hierarchical iterative shooting algorithm for volumetric radiosity was introduced. Finally, an example and algorithm evaluation were given in this paper.

**Key words:** volume hierarchical iteration; volumetric radiosity; virtual reality; voxel

在虚拟现实图形技术中, 许多优秀的方法逐渐问世, 如光线追踪方法(Ray Tracing), 边界体方法(Marching Cube)等. 本文要介绍的体层次迭代发射算法是用于虚拟现实图形演示的新方法——体放射法(Volumetric Radiosity). 传统的放射方法, 基于密闭空间中的热量辐射传导原理, 考虑三维物体的表面, 都是由发射和放射光线的基本单元组成, 从

而以较高的效率生成实体图形的方法. 然而, 要生成具有真实感的图形, 这种传统方法的计算量太大, 效率不高. 为了降低计算的复杂性, 人们已经采用子结构的方式对它进行了改进<sup>[1,2]</sup>, 这种改进是将物体表面划分成更小的组成单元. 另一种改进就是层次技术<sup>[3,4]</sup>, 即对表面单元建立分层结构, 从而实现了将具有  $N$  个表面单元的计算复杂性从  $O$

收稿日期: 2000-01-22; 修订日期: 2000-09-10.

基金项目: “九五”国防预研重点攻关项目资助课题(14.1.2.3)

作者简介: 顾耀林(1948-), 男, 江苏无锡人, 高级工程师.

( $N^2$ )降至  $O(N)$ 。

体放射法是建立在体单元(Voxels)基础上的。它同时也适用于使用表面单元的传统放射法。体单元对光线的发射、吸收、漫射和散射,是本方法研究的重要内容。诚然,物体的几何形状,以及传播光线的介质,如云、烟、雾、灰尘等,都会影响景物表面的明暗程度。本方法涉及的数据只是单一的体单元数据,它可由专用设备扫描,或用软件方法模拟,或对非体单元数据进行体单元化(Voxelization)而得到。利用体放射法可演示体单元生成的图形,从而得到具有虚拟真实感(灵境)的高质量三维图形。由于体单元的数量通常都相当大,故带来的存储需求和计算复杂性也相当惊人,要使体放射法达到实用阶段,必须寻求一种新的算法,减少存储开销和提高计算效率,这就是层次迭代发射算法。

## 1 体放射法的原理

### 1.1 光线的计算

首先设想有一束极细的光线,以光亮度  $I$  在方向  $\omega$  上穿过距离  $dI$ ,并在介质中发射、吸收或散射。则经过距离  $dI$  后,由于吸收而造成的能量损耗为  $K_a I dI$ 。其中  $K_a$  是吸收系数,它表示光线沿发射方向经过单位距离被吸收的光亮度的大小。同时还存在向外散射的能量损耗  $K_s I dI$ ,  $K_s$  为散射系数,表示光线经过单位距离散射掉的光亮度的大小。

光线穿越距离  $dI$ ,它得到的光亮增益为  $K_a E dI$ ,此处  $E$  为介质的表面反射率。同样,它还得到由于向内的散射能量增益,用函数  $\Phi(\omega, \omega')$  表示从  $\omega'$  方向散射到  $\omega$  方向的能量增益,则对各向同性散射,有  $\Phi(\omega, \omega')=1$ ,对其余情况,这种向内的散射(in-scattering)增益为:

$$\frac{K_s}{4\pi} \int_{\omega'} I(\omega') \Phi(\omega, \omega') d\omega' dI \quad (1)$$

其中  $I(\omega)$  是从方向  $\omega$  来的光亮度,则光线在  $\omega$  方向传播时的光亮度公式为

$$\frac{dI}{dI} = -K_a I - K_s I + K_a E + \frac{K_s}{4\pi} \int_{\omega'} I(\omega') \Phi(\omega, \omega') d\omega' \quad (2)$$

由于体放射法使用体单元,若光线从位置  $x_1$  至  $x_2$  到经过的体单元数用  $V$  表示,则发射光亮增

益和向内散射光亮增益可表示为:

$$4K_a V E + \frac{4VK_s}{4\pi} \int_{\omega'} \int_{\omega} I(\omega') \Phi(\omega, \omega') d\omega' d\omega \quad (3)$$

### 1.2 体放射方程

对本方法而言,所有的景物都由体集合而成,而体又可被分解成三维体单元。体单元数据包括采样数据、模拟数据和体单元化的几何体数据。其中采样数据可以从核磁共振仪,人体断层扫描仪、高倍显微镜等得到。

每个体单元(Voxel)都能对光线进行发射、吸收、散射和传送。体单元进行光线的各向同性发射和漫射都是可能的,各向同性发射意味着朝各个方向发射的光亮都相等,而漫射则适用兰伯特(Lambertian)漫射模型。同理,体单元也可进行光线的各向同性散射或漫散射。进入体单元内的光线若不被吸收和散射,则光线将保持原有属性继续传播。

考虑方程(3),若对一个物体而言,其光线的发射、吸收和散射均为各向同性,因为物体可分解成数量有限的体单元,则沿  $\omega$  方向的  $4\pi$  弧度的积分可以用体单元的总数来代替,其内层对  $\omega'$  的  $4\pi$  弧度积分也可以由放射途中经过的体单元来取代。则其有  $N_v$  个体单元的物体的第  $i$  个体单元的放射  $Q_{Vi}$  的方程为:

$$Q_{Vi} = \frac{K_{a_i}}{K_{t_i}} E_i + \frac{K_{s_i}}{K_{t_i}} \sum_{j=0}^{N_v} Q_{Vj} P_{ij} \quad (4)$$

其中,  $K_{t_i} = K_{a_i} + K_{s_i}$  是体单元(Voxel)  $i$  的光亮度衰减系数。

$P_{ij}$  取代方程(3)中的函数  $\Phi$ ,是体单元  $i$  和体单元  $j$  之间的放射能量。如果光线的发射、吸收和散射不是各向同性的,则情况要复杂得多,上述方程中的因子  $P_{ij}$  取决于两个体单元的相互朝向。假定既存在漫射,又有各向同性的发射、吸收和散射,则方程(4)需要进行扩充,因为体单元的放射性能无法由一个值决定。对每个体单元  $V_i$ ,有两个放射值:  $Q_{Di}$  是它的漫射放射光,  $Q_{Ii}$  是它的各向同性放射,这样方程(4)被表示为:

$$Q_{Di} = \frac{K_{a_i}}{K_{t_i}} E_{Di} + \frac{K_{sd_i}}{K_{t_i}} \sum_{j=0}^{N_v} [P_{DD_{ij}} Q_{Dj} + P_{DI_{ij}} Q_{Ij}] \quad (5)$$

$$Q_{Ii} = \frac{K_{a_i}}{K_{t_i}} E_{Ii} + \frac{K_{si_i}}{K_{t_i}} \sum_{j=0}^{N_v} [P_{ID_{ij}} Q_{Dj} + P_{II_{ij}} Q_{Ij}] \quad (6)$$

其中  $K_{sd_i} + K_{si_i} = K_{s_i}$

体单元  $v_i$  的漫射放射光  $Q_{D_i}$  是本体单元漫射的光的总量加上从所有的体单元  $N_v$  以漫射系数  $K_{sd_i}$  漫射到  $v_i$  的光的总量之和. 到达体单元  $v_i$  的光线, 要么是漫射放射光  $Q_D$ , 要么是各向同性放射光  $Q_I$ . 因子  $P_{DD_{ij}}$  表示由体单元  $v_j$  漫射放射或散射放射而到达体单元  $v_i$  的光线, 而  $P_{DI_{ij}}$  则是由  $v_j$  各向同性放射后到达  $v_i$  的光线, 这两个因子的细节将在下面讨论.

方程(6)类似方程(5), 各向同性放射光  $Q_I$  是本体单元发射的各向同性光的总量加上从所有的

体单元  $N_v$  以各向同性散射系数  $K_{si_j}$  散射到  $v_i$  的光的总量之和. 同理,  $P_{DI_{ij}}$  表示从  $v_j$  经漫射放射到达  $v_i$  的光, 而  $P_{II_{ij}}$  是从  $v_j$  经各向同性放射后到达  $v_i$  的光.

### 1.3 光线生成参数

在体放射法中, 光线从体单元  $v_j$  出发经过放射到达体单元  $v_i$  的相互作用如图 1 所示. 其中 (A) 是各向同性发射和散射, (B) 为漫射和各向同性散射, (C) 为漫射和漫反射. 所谓放射能量, 是光线在两个体单元之间传播时而发生的能量交换, 即光线从体单元  $v_j$  出发经过放射到达体单元  $v_i$  的能量.

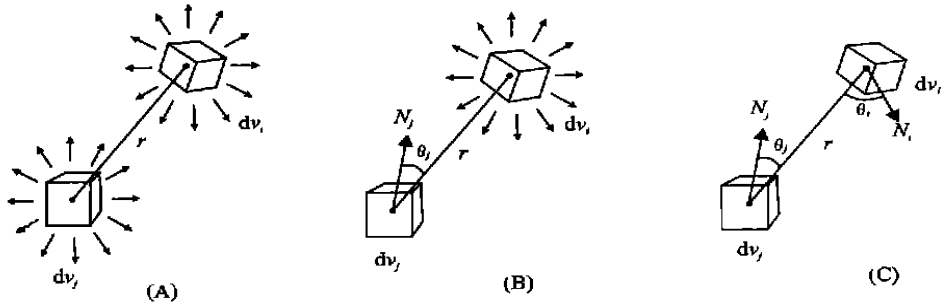


图 1 光线在两个体单元之间的传播

Fig. 1 Light traveling between two voxels

对图 1 中的 (A), 如果用  $r$  表示体单元  $v_i$  和  $v_j$  之间的距离,  $x_i$  和  $x_j$  表示  $v_i$  和  $v_j$  的位置, 用  $V_i$  和  $V_j$  分别表示  $v_i$  和  $v_j$  的体单元数,  $\tau(x_i, x_j)$  表示光线从  $x_i$  传播到  $x_j$  时所具有的光亮, 则对各向同性的光发射和散射, 从体单元  $v_j$  出发经放射到达体单元  $v_i$  的放射能量为

$$F_{ij} = \int_{V_i} \int_{V_j} \frac{\tau(x_i, x_j) K_i K_j Q_I dV_i dV_j}{\pi r^2} \quad (7)$$

则方程(6)中的减光参数  $P_{II_{ij}}$  和  $P_{DI_{ij}}$  可表达为:

$$P_{II_{ij}} = \frac{F_{ij}}{V_i K_t Q_I} = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} \int_{V_j} \frac{\tau(x_i, x_j) K_i K_j dV_i dV_j}{\pi r^2} \quad (8)$$

$$P_{DI_{ij}} = \frac{F_{ij}}{V_i K_t Q_{D_j}} = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} \int_{V_j} \frac{L(\theta_j) \tau(x_i, x_j) K_t \cos(\theta_j) dV_i dV_j}{\pi r^2} \quad (9)$$

此处,  $\theta_j$  是  $x_i$  和  $x_j$  中心连线与面元  $A_j$  的法矢量  $N_j$  的夹角, 如图 2 所示.  $L(\theta_j)$  是一个逻辑常数项, 当  $\cos(\theta_j) \geq 0$  时  $L(\theta_j) = 1$ , 否则为 0.

$$P_{DI_{ij}} = \frac{F_{ij}}{V_i K_t Q_{I_j}} = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} \int_{V_j} \frac{L(\theta_i) \tau(x_i, x_j) K_t \cos(\theta_i) dV_i dV_j}{\pi r^2} \quad (10)$$

$$P_{DD_{ij}} = \frac{F_{ij}}{V_i K_t Q_{D_j}} = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} \int_{V_j} \frac{L(\theta_i) L(\theta_j) \tau(x_i, x_j) K_t \cos(\theta_i) (\theta_j) dV_i dV_j}{\pi r^2} \quad (11)$$

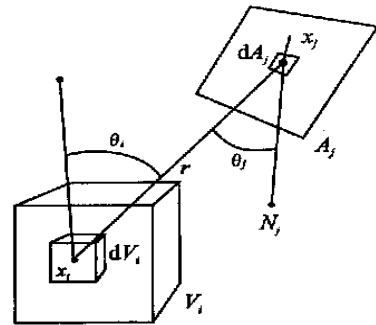


图 2 从体单元  $V_j$  到  $V_i$  体单元的漫射和漫散射  
Fig. 2 Diffuse radiosity from  $V_j$  arriving at a voxel  $V_i$  for diffuse scattering

同理可得方程(5)中的参数  $P_{DI_{ij}}$  和  $P_{DD_{ij}}$ .

## 2 体层次迭代体发射算法

### 2.1 算法设计

上面两节已解决了体放射法中的放射方程和各参数的计算,从理论上讲似乎已经解决了所有问题,实际并非如此简单.考虑一个简单物体,并将其作一个基本分割,使其具有  $N_v = 64^3$  个体单元(voxels),和  $N_s = 64^2$  个面元(patch),则总共需计算  $4N_v^2 + 2N_v N_s + N_s^2 = 277\ 042\ 167\ 808$  个因子,需要TB(Terabyte)量级的存储,这是不可能实现的.所以,必须设计新的算法,以降低体放射法对存储的需求.一种迭代算法<sup>[5]</sup>,和半立方体技术<sup>[6]</sup>被应

用于传统的放射算法中.接着又针对基本单元对光线的放射、吸收、反射和散射,使用高阶函数进行迭代<sup>[7]</sup>,结果是迭代的时间很长.1993年出现的层次放射法<sup>[8]</sup>和基于小波理论的高阶单元法<sup>[9]</sup>都只能应用于传统的放射方法中.

将层次结构用于体放射法,首先将物体按层次划分成不同的体单元,如图3所示.顶层结构具有较大的面元,对最底层的体单元,只估算由发射能量  $E_D$  和  $E_I$  放射系数  $K_{sd}$ 、 $K_{si}$  和  $K_a$  所生成的放射值  $Q_D$  和  $Q_I$ .对顶层的体单元,则要完成对两个元素  $e_i$  和  $e_j$  之间的迭代计算,算法描述如下:

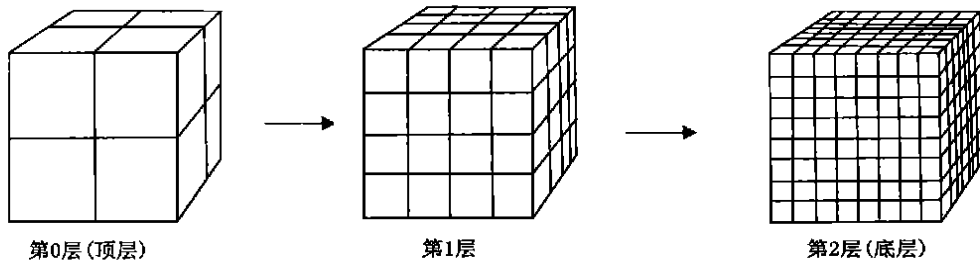


图3 具有层次结构的体单元模型

Fig.3 A hierarchical structure model for a volumetric object

1) 初始化:生成体单元层次结构和面单元层次结构 ( $Q_D \&\Delta Q_D \rightarrow E_D$ ,  $Q_I \&\Delta Q_I \rightarrow E_I$ ,  $Q_S \&\Delta Q_S \rightarrow E_S$ );

2) 对每层结构的顶层元素找出最大的放射值变化量  $\Delta Q_{max} \rightarrow \Delta Q_{max} < \epsilon$  时则迭代结束,否则 Goto 3);

3) 对每层结构的顶层各元素  $e_i$  进行放射迭代,并置  $\Delta Q_{max}$  为 0,更新放射估算值后,Goto 2);

### 2.2 算法复杂性评估

为了分析本算法的计算复杂性,不妨考虑一个物体由  $O(N^3)$  个体单元组成.每个面或等值面由  $O(N^2)$  个面单元组成,则元素之间的迭代假定为线性的,则最少的时间复杂度为  $O(N)$ ,加上元素可见性的空间分割需额外的计算量,则体放射法总的计算复杂性为  $O(N^7)$ .

由于采用层次结构,将迭代只用于数量相对少得多的顶层面元的元素,故从理论上分析,最佳的

时间复杂性可减少至  $O(N^7/2^{7L})$ ,其中  $L$  为层次结构的层数.当然这是理论最佳值,实际上它不仅取决于层数,还取决于原始数据模型的平滑程度和控制量  $\epsilon$  的大小.

## 3 结论

基于体单元的体放射法可生成复杂景物的具有VR(虚拟现实)特性的高质量图形,是一种优秀的方法.采用体层次迭代体发射算法可大大减少图形的生成时间.

体放射法的改进之一是可以采用非均匀的分层方法提高精度,其二是已经知道体放射方程中的系数将影响光的亮度和颜色,但如何更好地确定这些系数的合适范围是一个十分困难的问题.对计算时间的要求在高性能计算机十分普及的今天已不是问题,可通过并行处理和分布式计算解决.

## 参考文献

- [1] COHEN M F. An efficient radiosity approach for complex environments[J]. *IEEE Computer Graphics and Application* 1986, 6(2): 26~30.
- [2] HECKBERT P S. Adaptive radiosity textures for bidirectional ray tracing[J]. *Computer Graphics* 1990, 24(4): 145~154.

- [3] HANRAHAN P S, SALZMAN D B. A rapid hierarchical radiosity algorithm for unoccluded environments[R]. *Realism and Physics in Computer Graphics* Springer-Verlag, 1990.
- [4] GORTLER S J. Wavelet Radiosity[J]. *Computer Graphics* 1993, (8): 221~230.
- [5] COHEN M F. A progressive refinement approach to fast radiosity image generation[J]. *Computer Graphics* 1988 22(4): 75~84.
- [6] RUSHMEIER H E, TORRANCE K E. The zonal method for calculating light intensities in the presence of a participating medium[J]. *Computer Graphics* 1987, 21(4): 293~306.
- [7] TROUTMAN R, MAX N. Radiosity algorithms using higher order finite elements[J]. *Computer Graphics*, 1993, (8): 209~212.
- [8] LISCHINSKI D. Computer hierarchical radiosity and discontinuity meshing[J]. *Computer Graphics* 1993, (8): 199~208.
- [9] GORTLER S J. Wavelet radiosity[J]. *Computer Graphics* 1993, (8): 221~230.

(责任编辑:秦和平 李春丽)

(上接第603页)

浮污垢性能方面,氧化淀粉优于常用的多聚磷酸钠.

### 3 结 论

1)氧化剂用量、反应温度、反应时间及pH值对淀粉的氧化反应都有影响,最佳工艺条件为氧化剂用量20%、反应pH值为9.0、反应时间为3.0h、反应温度为45℃.在最佳反应条件下制得的氧化淀

粉的羧基含量为2.01%.

2)氧化淀粉对钙离子具有封锁能力,随着羧基含量的增加,其对钙离子的封锁能力增大.

3)氧化淀粉对模拟固体污垢MnO<sub>2</sub>具有比较好的悬浮分散性,且悬浮分散能力随着溶液的质量分数及羧基质量分数的增加而增加.

4)氧化淀粉对模拟固体污垢MnO<sub>2</sub>悬浮分散性及分散稳定性优于常用的多聚磷酸钠.

### 参考文献

- [1] 惠斯特勒.淀粉的化学与工艺学[M].王雒文,闵大栓,杨家顺.北京:中国食品出版社,1987.
- [2] 张友松.变性淀粉中几种基团的测定方法[J].淀粉与淀粉糖,1995(1):40~44.
- [3] 刘德荣,毛逢根,颜杰.羧甲基淀粉的助洗作用[J].日用化学工业,1988(3):9~12.

(责任编辑:朱明 李春丽)