

Global Illumination Techniques for the Simulation of Participating Media

Dezeming Family

2022 年 12 月 28 日

正常字体：表示论文的基本内容解释。

粗体：表示需要特别注意的内容。

红色字体：表示容易理解错误或者混淆的内容。

蓝色字体：表示额外增加的一些注释。

绿色字体：表示额外举的一些例子。

目录

一 Introduction	1
二 Overview	1
2 1 确定性方法	1
2 2 随机方法	2
2 3 图表总结	2
三 Deterministic methods	2
3 1 Constant basis functions	3
3 1.1 Zonal method	3
3 1.2 Progressive refinement approach	3
3 1.3 Hierarchical radiosity	3
3 2 Spherical harmonics	3
3 3 Discrete ordinates	3
3 3.1 Local interactions	3
3 3.2 Global interactions	3
3 4 Implicit representation	3
3 4.1 3d-filter	3
3 4.2 Diffusion	3
四 Stochastic methods	3
4 1 Constant distance sampling	3
4 2 Random distance sampling	3
4 2.1 Light tracing	3
4 2.2 Bidirectional path tracing	4
五 Discussion	4
5 1 Progressive results	4
5 2 Sampling strategies	4
5 3 Isotropic media and Anisotropic media	4

abstract

本文综述了包括参与介质和考虑多重散射的环境的全局照明算法。本次调查的目的是描述这些方法：确定其基本技术、假设、局限性和使用范围。为此，将算法按功能类别进行分类，并简要回顾每种方法，讨论其复杂性及其利弊。最后，我们讨论了一些应用程序中的方法以及可以继续研究的领域。

我们还是只进行导读，而不详细描述细节内容。关于基本原理，在《体渲染的基本原理描述》中我给出了最为全面的符号表示。

— Introduction

这里简单介绍一下论文中的符号和描述：

$$\begin{aligned}\frac{dL(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} &= \kappa_t(\mathbf{x})J(\mathbf{x}) - \kappa_t(\mathbf{x})L(\mathbf{x}) \\ &= \kappa_a(\mathbf{x})L_e(\mathbf{x}) + \frac{\kappa_s(\mathbf{x})}{4\pi} \int_{S^2} L(\mathbf{x}, \omega_i) p(\omega_o, \omega_i) d\omega_i - \kappa_a(\mathbf{x})L(\mathbf{x}) - \kappa_s(\mathbf{x})L(\mathbf{x})\end{aligned}\quad (1)$$

$$J(\mathbf{x}) = \underbrace{(1 - \Omega(\mathbf{x}))L_e(\mathbf{x})}_{J_e(\mathbf{x})} + \frac{\Omega(\mathbf{x})}{4\pi} \int_{S^2} L(\mathbf{x}, \omega_i) p(\omega_o, \omega_i) d\omega_i \quad (2)$$

$$L(\mathbf{x}) = \underbrace{\tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x})L(\mathbf{x}_0)}_{L_{ri}(\mathbf{x})} + \underbrace{\int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \tau(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \kappa_t(\mathbf{u}) J(\mathbf{u}) d\mathbf{u}}_{L_m(\mathbf{x})} \quad (3)$$

$$J(\mathbf{x}) = J_e(\mathbf{x}) + \underbrace{\frac{\Omega(\mathbf{x})}{4\pi} \int_{S^2} L_{ri}(\mathbf{x}, \omega_i) p(\omega_o, \omega_i) d\omega_i}_{J_{ri}(\mathbf{x})} + \underbrace{\frac{\Omega(\mathbf{x})}{4\pi} \int_{S^2} L_m(\mathbf{x}, \omega_i) p(\omega_o, \omega_i) d\omega_i}_{J_m(\mathbf{x})} \quad (1)$$

公式 (1) 中可见每个点中发出的光都乘以了 κ_a (吸收项)，这与一般的体渲染公式有点区别，一般的体渲染公式没有乘以 κ_a (不过问题不大)。公式 (1) 的其他地方和我们以前接触过的都是完全一样的，只是符号有所不同，但很容易对照上去。

$\kappa_t = \kappa_s + \kappa_a$ 表示衰减系数； $J(\mathbf{x})$ 表示 source radiance，描述了局部产生的辐射度。见公式 (2)， $\Omega = \frac{\kappa_s}{\kappa_t}$ 表示散射 albedo (散射系数除以衰减系数)。

公式 (1) 积分的结果可见公式 (3)，这也与之前我们的描述是一样的。

公式红 (1) 中，把光源分为两个部分，一个是体空间外部的光源 L_{ri} ，一个是介质内的光源 L_m 。

求解方式中，常用两步法，即第一步是光过程 (Illumination Pass)，用来计算 $J(\mathbf{x})$ ；第二步是可视化过程 (Visualization Pass)，利用前面计算的 $J(\mathbf{x})$ 得到结果。

本文中我们只会介绍多重散射的方法。

二 Overview

我们把现存的方法分为两个大类：确定性方法 (deterministic) 和随机 (stochastic) 方法。

2.1 确定性方法

确定性方法根据方向空间进一步分类，区分各向同性和各向异性方法。所有各向同性方法都使用常数基函数来计算 form factors。这些方法中的第一种是 zonal method，它是对经典辐射度方法的扩展——这种改进是通过在 progressive refinements method 以及 hierarchical radiosity(HR) 的语境中使用层次结构来实现的。

确定性方法可以通过球面谐波 (P-N 方法)、离散坐标或一些隐式表示来处理各向异性。Kajiya 等人在截断球面谐波基 (truncated spherical harmonic basis) 中展开辐射度，并构造一个偏微分方程组。Bhate 等人通过使用球面谐波基来扩展 zonal method。

离散坐标是指将方向空间离散为一组 bins。使用体素网格对参与介质进行建模，可以对每个体素局部求解传输方程，从而更新其出射辐射，即改变其邻居的入射辐射，这反过来必须求解其出射辐射度。或者，可以考虑所有成对元素之间的能量交换，作为 zonal method 的扩展，设置和求解系数为 form factors 的方程组。Max 近似了 form factors 的效果，从而避免了它们的计算。

最后，一些方法使用辐射方向分布的隐式表示（以散射模式或扩散方程编码）。在 Nishita 等人的方法中，参与介质的点内部在观察方向上对辐射度 $L(\mathbf{x})$ （对于二阶和三阶散射）的贡献以一组扩展 form factors 的形式出现在构成 3d 滤波器的网格中。这些 form factors 必须乘以相关点处的能量，并累加得到。Stam 使用“扩散近似”来解决模拟介质的水滴之间的多重散射。将 blob 的介质源辐射限制为简单形式，扩散方程可以写成线性方程组，允许计算每个 blob 的源辐射。

2.2 随机方法

随机方法通过随机抽样的方式，使用沿着相互作用点的随机路径来求解传输方程。我们区分了通过使用恒定步长设置交互点的方法和对函数 κ_t 进行采样的方法。

另一种分类是根据方法的 view 相关性进行的。

如果方法是基于图像的，或者如果在 Visualization Pass 中求解像素辐射度（公式 (3)）需要一些额外过程（例如，使用光线跟踪）以获得 $L(\mathbf{x})$ 值，我们将该方法标记为 view 相关。

2.3 图表总结

研究论文的总结和分类如上表 (1) 所述。斜体样式的项表示无法解决全局照明问题的方法（在这些场景中只有一个体需要照明，而没有其他物体）。表 (2) 提供了本文中使用的符号和术语。

Space of directions						
Isotropic		Anisotropic				
Constant basis functions		Spherical harmonics	Discrete ordinates		Implicit representation	
Zonal method: [16]		[8]	Based on local solutions (local interactions)		Global interactions	3d-filter: [12]
Hierarchy		[3]	Progr. Ref.: [13]	Sweeps: [10]	Sweeps: [11]	Diffusion: [20, 21]
Progr. Ref.: [2, 19]	HR: [18]					

Distance sampling		
	Constant	Random
view independent	Light tracing: [4]	Light tracing: [14]
view dependent	Light tracing: [5]	Bidirectional path-tracing: [9]

Table 1. Deterministic (top) and stochastic (bottom) methods.

Symbol	Units	Meaning
$J(\mathbf{x}, \omega), L(\mathbf{x}, \omega)$	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$	Source radiance and radiance
M	—	Number of direction bins / harmonic coefficients
n	—	Number of elements per axis in a regular grid
$p(\omega_o, \omega_i)$	—	Phase function
$s, v \quad (v = n^3)$	—	No. of patches / volume elements (voxels or blobs)
\mathbf{x}	—	A point in \mathcal{R}^3
$\kappa_a(\mathbf{x}), \kappa_s(\mathbf{x}), \kappa_t(\mathbf{x})$	m^{-1}	Absorption, scattering and absorption coefficient
$\tau(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$	—	Transmittance
ω	— / sr	Direction / Solid angle
$\Omega(\mathbf{x})$	—	Scattering albedo

Table 2. Table of terms.

三 Deterministic methods

由于时间关系，确定性方法我没有仔细看（主要是年代过于久远），以后有需要再做了解。

3 1 Constant basis functions

3 1.1 Zonal method

该方法是对辐射度方法的扩展，用于各向同性参与介质。体素的辐射度仅有自发射项和散射项。体之间与体和表面之间的 form factors 被定义来包含 transmittance factor。此方法可以用于在包含表面和体介质的场景中。

3 1.2 Progressive refinement approach

3 1.3 Hierarchical radiosity

3 2 Spherical harmonics

3 3 Discrete ordinates

3 3.1 Local interactions

3 3.2 Global interactions

3 4 Implicit representation

3 4.1 3d-filter

3 4.2 Diffusion

四 Stochastic methods

随机方法分为两类，一是采样固定步长 [4, 5]；二是采样累积概率密度函数 [14, 9]。

4 1 Constant distance sampling

Blasi 等人 [4, 5] 使用了光的粒子模型来采样参与介质。[4] 只用来处理单个参与介质，[5] 被用于渲染混合场景（包括表面结构和多个参与介质体）。

采样光束以恒定长度的步长前进，在前进中会根据吸收项来不断计算光衰减。[5] 中使用渐进技术渲染混合的场景，根据某些阈值，曲面被分类为“漫反射”或“镜面反射”。在“照明过程”（Illumination Pass）中，当采样光束撞击漫反射表面时，其能量存储在那里（光束路径结束），而当光束撞击镜面反射曲面时则使用重要性采样进行反射。

在参与介质中，光束如上所述进行，但只有当束离开介质时（如果离开），其能量才被记录（在边界体素处）。由于这种存储方案，穿过体空间的光线数量必须高于每体素存储的所需的数量，以获得离开体的能量的精确采样。

[5] 是一种有偏的方法，随着采样步长逐渐缩短，结果会趋近于无偏，但是会消耗更多的时间。

4 2 Random distance sampling

4 2.1 Light tracing

Pattanaik[14] 用 Monte Carlo 光追踪方法来采样交点（吸收点或者散射点），其累积概率密度函数是：

$$1 - \exp\left(-\int_0^S \kappa_t(u) du\right) \quad (四.1)$$

S 是前进的距离。在交点处，Simple Absorption 方法会基于 Ω 决定是散射还是吸收事件（使用 Woodcock 追踪来估计穿透率就是这种方式）。而 Absorption Suppression 方法会一直散射光束，但通过乘以 Ω 来减少它们的 flux（在 PBRT 中，采样估计散射的前进路径就是这种方式）。

在这里会使用不同的方差减少技术 (variance reduction techniques): 光束与每个体素的强制相互作用、刚提及的 Absorption Suppression 方法和粒子发散 (Particle Divergence) 方法 (其中出射束在散射点处分裂为多个束)。所提出的存储方案适用于各向同性散射, 但可以更改以处理各向异性散射。

4 2.2 Bidirectional path tracing

[9] 中提出了非发射型参与介质的双向路径追踪方法。

这里的方法可以参考 Veach 的论文, 就是把双向路径追踪引入到了体渲染中。

五 Discussion

5 1 Progressive results

本小节讨论的是需要多次渲染不断达到目标结果的方法 (渐进式渲染)。

多网格技术可用于当获得足够精确的解时停止解序列的计算。该序列从非常快速地计算第一个粗略解开始, 该粗略解在连续步骤中得到改进。这可以通过 [18] 中的分层方法实现, 如果计算解的时间相对较少, 那么使用多网格技术可以获得粗略解。

另一方面, Pattanaik 等人 [14] 的蒙特卡洛光线跟踪方法在给定的短时间内将在 Illumination Pass 中产生远未收敛的照明估计。

然而, 在 Blasi 等人 [5] 的光跟踪方法中, 漫反射表面上的反射被消除, 因此每当光束与漫反射表面相交时, 其路径就终止, 漫反射表面会积累能量。在每次迭代中, 表示具有最高值的元素的未射出的能量的一组束被传播到环境中, 因此是一种渐进细化算法。注意, 该技术还引入了偏差, 因为在给定点处的反射过程被元素内的随机点的发射所代替。[5] 的渐进性质需要迭代计算图像, 然而, 除非使用了非常多的光束, 否则介质的照明将远远不能收敛。

在双向光线跟踪中, 由于它是一种视图相关的方法, 其中照明直接按像素来求解, 因此图像的质量可以逐渐提高, 从非常粗糙的近似图像开始, 随着程序的执行逐渐收敛到准确解。

通过扫描能量 [10, 11] 使用离散坐标的方法处理的体照明的部分结果可以在连续迭代之间给出。如果在最有能量的元素的光线照射之后, ambient 项用于显示目的 (作为经典光能传输 ambient 项的泛化), 则使用层次进行渐进细化的方法可以很好地完成。这也可用于其他渐进细化方法, 如扩散近似 [20, 21] 和 Blasi 等人的方法 [5]。

5 2 Sampling strategies

应该注意的是, [5] 的采样策略导致了结果有偏差, 而 [14] 的采样策略则没有。这是因为光束只能在倍数距离处散射, 因此散射前的期望长度不等于没有吸收事件发生的平均自由长度。

尽管只要值减小误差就会减小, 但为了确保方差低于某个阈值的结果, 所需的时间大约为 δ 的倒数。此外, 我们已经测试出对于相同的方差阈值和设置相对较小的步长值以获得可容忍的偏差, 使用 [14] 的采样过程的计算时间总是低于 [5] 的计算时间。

5 3 Isotropic media and Anisotropic media

不是很清楚这里说的“各向异性介质”为什么对于 [14] 来说是有偏的, 而论文中只说双向方法的结果是无偏的。按理来说不管是不是各向异性, [14] 都应该是无偏的才对。

考虑到年代确实有些久远, 有些问题就不细究了 (关键也是身边没有了解的人)。

参考文献

- [1] D. Arques and S. Michelin. Proximity Radiosity: Exploiting Coherence to Accelerate Form Factor Computations. 6th EG Workshop on Rendering, pp. 144–153, June 1996.
- [2] N. Bhate. Application of Rapid Hierarchical Radiosity to Participating Media. Proc. of ATARV-93: Advanced Techniques in Animation, Rendering and Visualization, pp. 43–53, July 1993.
- [3] N. Bhate and A. Tokuta. Photorealistic Volume Rendering of Media with Directional Scattering. 3rd EG Workshop on Rendering, pp. 227–245, Bristol, UK, May 1992.
- [4] P. Blasi, B. LeSaëc and C. Schlick. A Rendering Algorithm for Discrete Volume Density Objects. Computer Graphics Forum, 12(3):201–210, September 1993.
- [5] P. Blasi, B. LeSaëc and C. Schlick. An Importance Driven Monte-Carlo Solution to the Global Illumination Problem. 5th EG Workshop on Rendering, pp. 173–183, June 1994.
- [6] P.H. Christensen. Hierarchical Techniques for Glossy Global Illumination. PhD thesis, Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 1995.
- [7] P. Hanrahan, D. Salzman and L. Aupperle. A Rapid Hierarchical Radiosity Algorithm. Computer Graphics, 25(4):197–206, July 1991.
- [8] J.T. Kajiya and B.P. Von Herzen. Ray Tracing Volume Densities. Computer Graphics, 18(3):165–174, July 1984.
- [9] E.P. Lafortune and Y. Willems. Rendering Participating Media with Bidirectional Path Tracing. 6th EG Workshop on Rendering, pp. 92–101, June 1996.
- [10] E. Languenou, K. Bouatouch and M. Chelle. Global Illumination in Presence of Participating Media with General Properties. 5th EG Workshop on Rendering, pp. 69–85, June 1994.
- [11] N.L. Max. Efficient Light Propagation for Multiple Anisotropic Volume Scattering. 5th EG Workshop on Rendering, pp. 87–104, June 1994.
- [12] T. Nishita, Y. Dobashi and E. Nakamae. Display of Clouds Taking Into Account Multiple Anisotropic Scattering and Skylight. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series: SIGGRAPH '96, pp. 379–386, 1996.
- [13] C. Patmore. Simulated Multiple Scattering for Cloud Rendering. In Graphics, Design and Visualization, pp. 59–70, North-Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1993.
- [14] S.N. Pattanaik and S.P. Mudur. Computation of Global Illumination in a Participating Medium by Monte Carlo Simulation. The Journal of Vis. and Comp. Animation, 4(3):133–152, 1993.
- [15] H. Rushmeier. Rendering Participating Media: Problems and Solutions from Application Areas. 5th EG Workshop on Rendering, pp. 35–56, June 1994.
- [16] H.E. Rushmeier and E. Torrance. The Zonal Method For Calculating Light Intensities in the Presence of a Participating Medium. Computer Graphics, 21(4):293–302, July 1987.
- [17] R. Siegel and J.R. Howell. Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd ed. Hemisphere Publishing, Washington, 1992.
- [18] F.X. Sillion. A Unified Hierarchical Algorithm for Global Illumination with Scattering Volumes and Object Clusters. IEEE Trans. on Vis. and Comp. Graphics, 1(3):240–254, Sept. 1995.

- [19] L.M. Sobierajski. Global Illumination Models for Volume Rendering. Chapter 5: Volumetric Radiosity, pp. 57-83, PhD Thesis, 1994.
- [20] J. Stam. Multiple Scattering as a Diffusion Process. 6th EG Workshop on Rendering, Dublin, Ireland, 1995, pp. 41-50.
- [21] J. Stam. Multi-Scale Stochastic Modelling of Complex Natural Phenomena. PhD Thesis, Dept. of Computer Science, University of Toronto, 1995.
- [22] E. Veach and L. Guibas. Optimally Combining Sampling Techniques for Monte Carlo Rendering. Computer Graphics Proc., Annual Conf. Series: SIGGRAPH ' 95, pp. 419-428, 1995.