

7-2-2020

Research of 3D Cloud Illumination Model Based on Importance Sampling

Yonghua Xie

1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information science and Technology, Nanjing 210044, China;;2. Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information and Technology, Nanjing 210044, China;

Fuxing Yuan

1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information science and Technology, Nanjing 210044, China;;

Wang Chang

1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information science and Technology, Nanjing 210044, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research of 3D Cloud Illumination Model Based on Importance Sampling

Abstract

Abstract: Currently existing 3D cloud simulation illumination models were confronted with the shortcomings such as complexity of implementation and low rendering efficiency. *Herein a calculation method for illumination model based on importance sampling was proposed; Aiming at the problems of the old phase function, a new phase function was proposed to improve the rendering efficiency and quality. By the design of the importance function, the method did importance sampling in integrated interval and combined two phase functions to render the cloud.* The results of the simulation show that the presented method has enhanced the rendering speed with the guarantee of rendering quality. The result of the visualization can display the physical characters of the cloud both in rendering efficiency and quality, ensuring perfect visual effect.

Keywords

illumination model, phase function, importance sampling, multiple scattering, three dimensional cloud rendering

Recommended Citation

Xie Yonghua, Yuan Fuxing, Wang Chang. Research of 3D Cloud Illumination Model Based on Importance Sampling[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 57-62.

基于重要性采样的三维云光照模型的研究

谢永华^{1,2}, 袁复兴¹, 王畅¹

(1. 南京信息工程大学 计算机与软件学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 江苏省网络监控中心, 南京 210044)

摘要: 针对目前三维云的模拟过程中光照模型实现复杂、绘制效率低等问题, 在多次前向散射光照模型的基础上提出了一种光照模型计算方法去解决光照模型中积分问题; 针对多重散射光照模型中相位函数过于简单, 不利于云的真实渲染的问题, 优化现有相位函数, 增强云的真实感。该方法通过对积分区间进行重要性采样解决光照积分计算过程中均匀采样效率过低的问题并结合两种相位函数实现了对云的渲染。实验结果表明: 该方法在保证绘制质量的基础上提高了绘制速度, 无论在效率上还是绘制效果上都更好地展示了云的物理特性, 取得了很好的显示效果。

关键词: 光照模型; 相位函数; 重要性采样; 多次散射; 三维云渲染

中图分类号: TP317.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 01-0057-07

Research of 3D Cloud Illumination Model Based on Importance Sampling

Xie Yonghua^{1,2}, Yuan Fuxing¹, Wang Chang¹

(1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Currently existing 3D cloud simulation illumination models were confronted with the shortcomings such as complexity of implementation and low rendering efficiency. *Herein a calculation method for illumination model based on importance sampling was proposed; Aiming at the problems of the old phase function, a new phase function was proposed to improve the rendering efficiency and quality. By the design of the importance function, the method did importance sampling in integrated interval and combined two phase functions to render the cloud.* The results of the simulation show that the presented method has enhanced the rendering speed with the guarantee of rendering quality. The result of the visualization can display the physical characters of the cloud both in rendering efficiency and quality, ensuring perfect visual effect.

Keywords: illumination model; phase function; importance sampling; multiple scattering; three dimensional cloud rendering

引言

云是一种大气现象, 在日常生活中随处可见, 云的真实感的模拟在飞行员飞行模拟、战场的实时

仿真以及天气预报等领域有着重要的应用。而云的色彩的模拟对于提高场景的真实性具有很大的作用, 但是云的光线模拟中云与自然光, 太阳光等产生的传播机制十分复杂, 所以云的光照模拟是当前研究的一大热点。

早在上世纪 80 年代, Blinn^[1]首先提出了一个光与云粒子相互作用的简单模型去研究云对光的反射特性和透射特性, 但是该模型进行了大量的简



收稿日期: 2014-08-29 修回日期: 2014-10-14;
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61375030);
国家863计划项目(2011AA7123032B);
作者简介: 谢永华(1976-), 男, 江苏靖江, 教授, 研究方向为模式识别、基于内容的图像检索技术、气象数据三维可视化技术; 袁复兴(1989-), 男, 江苏徐州, 硕士生, 研究方向为图像处理、三维可视化。

<http://www.china-simulation.com>

化, 局限性很大。Sabella^[2]在这个模型的基础上提出了一种密度发射体模型, 该模型优化了光与粒子之间的相互作用, 但是没有考虑到云粒子对光线的多次散射效果。Nishita^[3]在上述研究的基础上提出了云的多次散射光照模型, 该模型是一个比较完备的模型, 在绘制效果上比以往研究有了显著的提高, 但是计算量却很大, 不能够用于大规模云场景的模拟。为了简化计算量, RTRC^[4]将云粒子的多重散射压缩至向前方向上的固定角度内, 简化了多重散射模型以满足实时绘制的要求。该模型在保证绘制效果的基础上大幅度提高了绘制速度, 但是由于采用的相位函数过于简单, 所以绘制效果不够逼真。徐华勋^[5]则通过分析云的光学特性, 在单一扩散光照模型的基础上提出了一种模拟多次光照的简化公式, 对于该模型的计算方法, 作者选择的是线性积分计算方法, 该计算方法导致计算量过大, 虽然绘制效果有所提高, 但是绘制速度却很慢, 不利于实时绘制。许涵^[6]简化和改进了 RTRC 的光照模型, 生成了云的散射颜色, 但是散射颜色过于单一, 和真实的云的散射色彩存在不小差距。CVVR^[7]则通过对现有的多次前向散射光照模型散射次数进行简化, 并结合多种相位函数, 实现了三维云的模拟, 达到了较为逼真的可视化效果。但是由于采用多种相位函数, 在大规模云场景的模拟时计算量很大。

通过分析以上光照模型的不足, 本文针对现有的模拟三维云的光照模型实现复杂, 计算耗时, 不能充分展示三维云物理特性的问题, 提出了一种基于重要性采样的光照模型的计算方法, 引入光线投射算法, 通过对现有的多次前向散射光照模型中相位函数的优化以及光照模型中的积分问题的有效解决, 运用 VC++ 和 OpenGL 开发工具, 实现三维云的模拟, 实验结果表明, 无论在效率上还是绘制效果上都更好地展示了云的物理特性, 达到了更好的可视化效果。

1 重要性采样

在过去的三维云可视化的研究中, 针对光照模型^[8]中积分问题的求解均采用 Harris 所采用的均匀采样^[9]去计算光照模型。然而计算方法采用均匀采样会存在以下 2 个问题:

(1) 如果 $f(x)$ 的梯度值变化特别剧烈且频繁, 均匀采样会导致采样点错过一些极值, 只能通过牺牲计算时间去增加采样点, 导致计算速度下降;

(2) 均匀采样更依赖于数据。加入对三维数据进行采样, 可能会采集 $10 \times 10 \times 10 = 1\ 000$ 个采样点, 假如通过仿真后发现实现结果错误, 接下来采取的策略会是在某一方向多采集一个点, 这样就会导致增加了 100 个采样点, 导致数据量急剧增加。

针对均匀采样的不足, 本文提出采用重要性采样策略, 对于函数的采样区间按照重要程度进行划分, 在函数值大的地方增加采样点。而在函数值较低的地方减少采样点, 从而在保证计算准确的基础上提高计算速度。

重要性采样的基本思想是通过一个相对简单分布函数的随机加权平均来近似计算目标分布函数的数学期望, 该相对简单的分布函数称为重要性函数, 引入重要性函数可以大幅度减少仿真样本, 从而在较短的运行时间内得到精确的仿真结果。

对于一个在区间 $[a, b]$ 上的函数 $f(x)$, 对其做积分 $I = \int_a^b f(x) dx$, 当 $f(x)$ 并不解析时, 无法直接积分, 比如 $f(x)$ 是一条毫无规律的曲线, 求积分过去多采用均匀采样进行计算, 如图 1 所示。其实质是由一系列相同宽度, 不同高度的小矩形面积和来近似曲线的面积。

但是很多时候, 函数梯度值变化剧烈, 存在多个极值, 函数值变化剧烈区域需要将区间划分为更多块, 需要刻画得更加精细, 值变化平缓的区域则取少量的采样点, 不需要刻画得太精确, 所以使用均匀采样会导致效率过低。

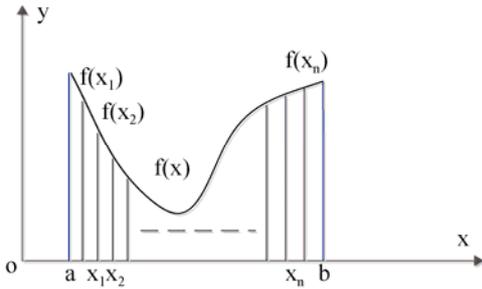


图 1 均匀采样计算 $f(x)$ 积分

图 2 中圆圈标明部分明显比非圆圈部分贡献低, 不需要精确刻画, 也就是说, 非圆圈的部分需要多采一些点, 而圆圈部分略采几个点即可, 该过程即为重要性采样, 如图 3 所示。

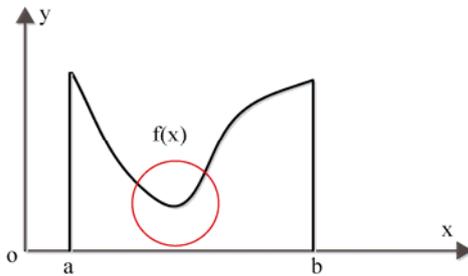


图 2 $f(x)$ 部分区域贡献较低

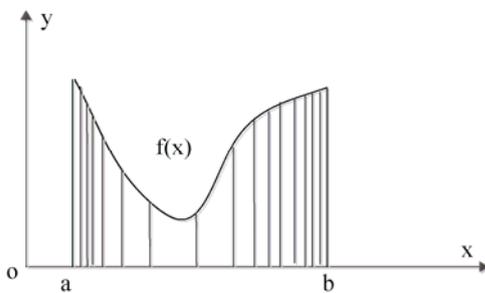


图 3 采样图

重要性采样的具体步骤如下所示:

首先我们寻找到一个和所求曲线相似的简单曲线作为 $p(x)$, $p(x)$ 要尽可能的简单便于求解并尽可能的与所求函数变化趋势相似。

故该曲线面积近似为:

$$S = \int_a^b f(x)dx = \frac{1}{N} \sum f(x_i) / p(x_i) \quad (1)$$

其中 $p(x)$ 称为概率分布函数, 也称为重要性函数(importance function), 重要性函数的选择要尽可能的符合 $f(x)$ 在空间 $[0, n-1]$ 上面的性质。

使用重要性采样可以使计算过程中采样点减少, 加快积分的收敛, 提高速度。采用重要性随机采样, 可能会产生一定的扰动, 但是视觉效果比走样更加容易让人接受, 因为人们的眼睛对于走样要比扰动敏感的多, 同时随机采样不受数据格式的影响, 可以每次只增加一个采样点, 直到达到要求的精度为止。

2 基于重要性采样的云的渲染

2.1 相位函数的优化

云的散射光照模型根据光线与云中粒子相互作用的关系, 一般可以分为单次散射^[10]和多次散射光照模型^[11]。而在云粒子间的多次散射中, 前向散射占主要地位, 因此 RTRC 在单次散射的基础上, 提出了多次前向散射的光照模型, 这样做好处是既压缩了部分运算量, 又考虑了大部分散射, 如图 4 所示。

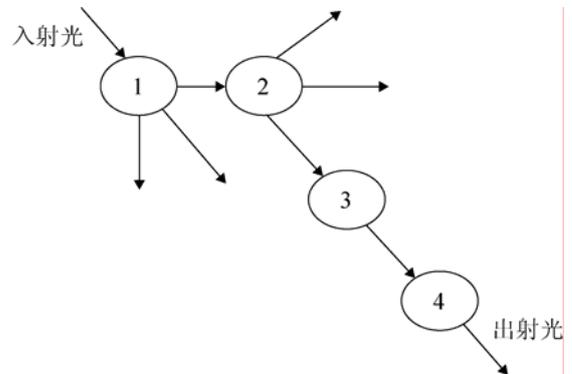


图 4 多次散射效应

一束入射方向为 l 的光线在穿过三维云时, 云中粒子点 P 处受到的光照强度为 $I(P, l)$, 该式表示在位置 P 处由 l 方向的所有直射光组成的光强, 其多次散射模型为:

$$I(P, l) = I_0(l) \cdot e^{-\int_0^{D_p} \tau(t) dt} + \int_0^{D_p} g(s, l) e^{-\int_0^s \tau(t) dt} ds \quad (2)$$

其中: $I_0(l)$ 是云外部 l 方向上光的强度; $\tau(t)$ 是云在 t 深度时的消光系数; D_p 是云沿着光方向在 P 位置的深度。 $g(s, l)$ 由公式(3)表示:

$$g(s, l) = \int_{4\pi} r(s, l, l') I(s, l') dl' \quad (3)$$

其中: $g(s, l)$ 为光在点 s 处从方向 l' 散射到方向 l 的函数; $r(s, l, l')$ 是双向散射分布函数, 用来决定点 s 处方向 l' 散射到方向 l 上入射光的百分比。双向散射分布函数 $r(s, l, l') = a(s) \times \tau(s) \times p(l, l')$, 其中 $a(s)$ 是在点 s 处的媒介反照率, $p(l, l')$ 是相位函数。

一个完整的多次散射算法必须计算所有光运动方向的取样数量。简化逼近值来计算光方向的多次前向散射, 让 $l' = -l$ 。取一个很小的立体角 r , 将(3)式简化为:

$$g(s, l) = r(s, l, -l) \times I(s, -l) \times r / 4\pi \quad (4)$$

由(4)式可知, 在多次前向散射光照模型的计算中, 只有相位函数 $p(l, l')$ 为未知量, 其余各部分参数均已知, 所以该光照模型的计算复杂度取决于相位函数以及计算方法的选择。

相位函数对三维云可视化的光照的渲染非常重要, 它描述了相关介质的散射特性。仅仅使用简单的瑞利散射, 并不能很好的展示粒子对于光线的散射效应, 而米氏相位函数^[12]则过于复杂, 不利于三维云的快速可视化。

文献[7]提出了将瑞利散射相位函数与米氏散射相位函数结合在一起进行计算的方法, 该方法在保证绘制质量的前提下, 在一定程度上提高了计算速度。但是由于米氏散射相位函数过于复杂, 在计算米氏散射相位函数时, 计算量依旧很大。为了解决以上问题, 本文采用瑞利散射相位函数和 schlick 相位函数进行结合。相位函数表示如下:

$$\varphi(\theta, g) = \frac{\sum \beta_i \varphi_i(\theta, g)}{\sum \beta_i}, \quad g \in (-1, 1) \quad (5)$$

g 是不对称因子(anisotropy factor)^[13], 表示散射的对称性。 β_i 为不同半径的粒子的散射系数, $\varphi_i(\theta, g)$ 为半径不同的粒子所采用的相位函数。 θ 是光照方向和视点方向之间的夹角。

和以往的相位函数相比, 本文使用的相位函数在光线严格向后散射($g = -1$), 向前散射($g = 1$), 各向同性散射($g = 0$)中的连续性得到保证的同时, 计

算速度比改进的 Henyey-Greenstein 相位函数^[14]以及文献[7]采用的相位函数要快的多, 如图 5 所示。其中上方的线表示的随着运行次数的增加, 米氏散射相位函数的运行时间长短。下方的线表示的是 schlick 相位函数的运行时间长短。由图 5 可以看出, 采用 schlick 相位函数进行计算, 计算速度要快的多。

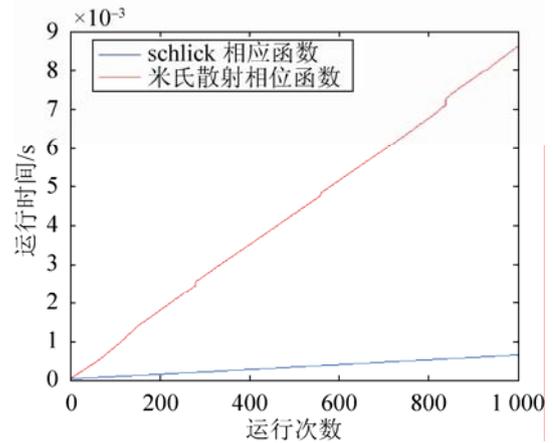


图 5 schlick 相位函数与米氏相位函数运行时间的比较

2.2 云的渲染算法

在本文算法中, $f(x)$ 值变化剧烈区域需要将区间划分为更多块, 值变化平缓的区域则取少量的采样点, 如图 3 所示。在式(3)中, $I(s, l')$ 是可以计算的, 实验过程中就可以在相位函数 $p(l, l')$ 值变化剧烈区域采取更多的采样点, 函数值变化平缓的区域采取相对较少的采样点。

云的光照模型的渲染分为光的预处理和实时处理 2 个部分, 首先从入射光的方向计算每个云粒子与入射光相互作用后的光强, 然后利用计算得到的光强从视点的角度实时渲染所有粒子。在预处理阶段, 根据云粒子距离入射光线的远近进行处理, 利用光线投射算法^[15]对体素中的粒子进行插值计算和重采样, 算出可视化粒子的光强。在可视化处理阶段, 通过相位函数控制粒子的颜色值和不透明度值。最后则通过光线投射算法计算出体数据在屏幕上的颜色, 从而可视化出云。云的光照模型渲染过程如下:

1) 计算重要性函数

通过反函数法计算重要性函数得到:

$$p(\theta, u) = \frac{2u + g - 1}{2gu - g + 1}, \quad u \in [0, 1] \quad (6)$$

2) 采样区间划分

根据重要性函数, 对相位函数进行采样区间的划分, 以 $g=0.87$, 采样点为 100 为例, 采样密度如图 6 所示, 在 $[0^\circ, 40^\circ]$ 区间内函数值变化剧烈, 采样 70 个点, $[40^\circ, 50^\circ]$ 区间内函数值变化比较平缓, 采样 20 个点, $[50^\circ, 100^\circ]$ 区间内函数值变化平缓, 采样 8 个点, $[100^\circ, 180^\circ]$ 区间内函数值变化平缓, 采样 2 个点。

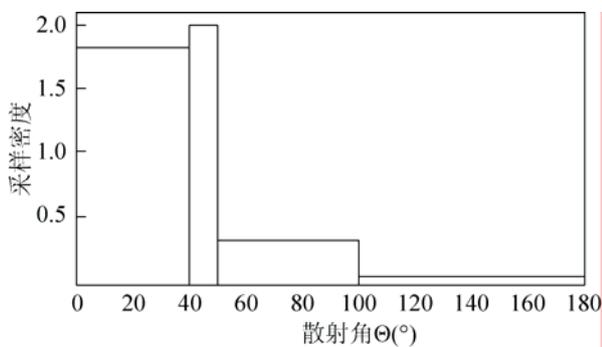


图 6 采样密度分布图

3) 预处理

Prep()

{

根据云粒子距离入射光线的远近进行处理,

p_k 为粒子大小;

$$l = \text{light.pos} - p_k.\text{pos};$$

$$w = l;$$

i_k = 云粒子与光源远近方向分配的不透明度值;

$$i_k = i_k * \text{light.color};$$

$$p_k.\text{color} = a_k \tau_k i_k r / 4\pi;$$

$$p_k.\text{alpha} = 1.0 - e^{(-\tau_i)};$$

}

4) 实时渲染部分

Render particle()

{根据云粒子距离视点远近进行处理, 同时进行相位函数的计算

$$w = p_k.\text{pos} - \text{view.pos};$$

$$p_k.\text{color} = p_k.\text{color} + \text{phase}(w, w);$$

}

在可视化的过程中, 用 $p_k.\text{color}$ 和 $p_k.\text{alpha}$ 可视化云中粒子。

3 实验结果及分析

本实验所用的硬件配置是 Intel Pentium 3.00 GHz CPU, 2.00 GB 内存、Intel HD Graphics 显卡, 操作系统为 Windows 7。实验数据为中尺度模式 WRF v3.3.1 模拟数据^[16]。实验中使用的数据为 WRF 模拟数据(分辨率为 10 km, 模拟区域格点数 11×11), 总共由 24 个时间步长的数据构成, 采用一系列参数化方案进行模拟得出的结果。模拟区域: 400×400 km 范围; 水平格距: 1 km; 中心纬度: 24° N; 中心经度: 119° E; 纬度范围: $22^\circ \sim 26^\circ$ N; 经度范围: $117^\circ \sim 121^\circ$ E; 垂直层数: 50 层三维气象数据。

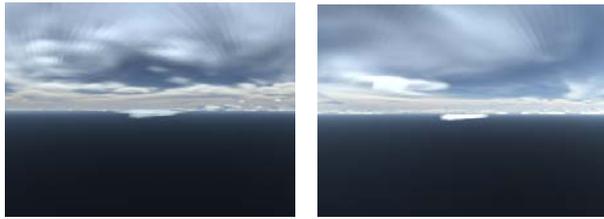
图 7 为采用重要性采样和均匀采样得出的渲染效果对比图。其中图 7(a)采用的是重要性采样方法, 图 7(b)采用的均匀采样方法, 由实验结果可以看出本文模拟出来的光照效果真实, 细节纹理特征明显。



(a) 基于重要性采样的云图 (b) 基于均匀采样的云图

图 7 采用重要性采样与均匀采样渲染效果的比较

图 8 为采用多次前向散射光照模型与单次散射光照模型的渲染效果对比图。由实验结果可以得出, 多次前向散射光照模型模拟出来的实验效果纹路细节特征更加明显, 单次散射光照模型模拟出来的云颜色暗淡, 细节特征较为模糊。



(a) 多次前向散射光照模型 (b) 单次散射光照模型

图 8 散射光照模型模拟效果的比较

图 9 为在重要性采样的基础上分别采用本文相位函数和瑞利散射相位函数的实验结果对比图。由图 8 可以得出采用本文方法模拟出的实验结果具有真实云的色彩特性,并且具有明显银色云缕的边界特征。



(a) 采用本文相位函数的云图 (b) 采用瑞利散射相位函数的云图

图 9 相位函数渲染效果的比较

表 1 给出了 RTRC, CVVR 与本文重要性采样方法渲染速度的对比分析,实验数据规格均为 $400 \times 400 \times 50$ 。3 种方法均采用多次前向散射光照模型,但是 RTRC 采用的是瑞利散射相位函数, CVVR 采用的是瑞利散射相位函数结合米氏散射相位函数的方法,本文采用的是瑞利散射相位函数结合 schlick 相位函数的方法。分析表 1 可以得出, RTRC 的绘制帧率为 19.4 FPS, CRRV 的渲染帧率为 23.2 FPS,采用本文方法的渲染帧率达到 25.8 FPS,绘制帧率比 RTRC 提高 6 帧左右,平均速度提高了 36.5%。

表 1 渲染速度对比表

方法	体数据规格	渲染帧率/fps
RTRC	$400 \times 400 \times 50$	19.4
CVVR	$400 \times 400 \times 50$	23.2
本文	$400 \times 400 \times 50$	25.8

4 结论

本文采用光线投射算法进行绘制,采用重要性采样策略计算光照模型积分并改进现有的相位函数,利用 C++ 完成绘制渲染过程,可视化部分采用 OpenGL 辅助完成,无论从渲染速度还是渲染效果方面比以往都有所提高,但是渲染质量方面仍可以进一步提高,比如加入光线反射、透射光照模型、引入光线辐射传输^[17]等。在以后的研究中要考虑这些因素,进一步提高云的真实感,加强可交互性。同时,实验结果中均出现锯齿化不连续区域现象,该现象是因为本文采取的绘制方法是体绘制方法,该方法是将体数据按照网格进行划分绘制,渲染时按块进行渲染,本文采用的是重要性采样方法进行渲染,在边界处采样点相对较少,所以会出现网格状现象。为了解决此现象,首先在网格边界处适当多采取采样点,从而让边界处更加的平滑,其次提高数据分辨率,对数据作进一步更加细致的处理,同时考虑到进行重要性采样带来的时间滞后问题,这会在以后的研究中进一步处理,使渲染出来的结果更加的真实,渲染速度更快。

参考文献:

- [1] Blinn J F. Light Reflection Function for Simulation of Clouds and Dusty Surfaces [C]// Proc. ACM Siggraph 82. USA: ACM, 1982: 21-29.
- [2] Paolo Sabella. A Rendering Algorithm for Visualizing Scalar Field [J]. Computer Graphics (S0167-7055), 1984, 22(4): 51-58.
- [3] T Nishita, Y Dobashi, E Nakamae. Display of clouds taking into Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light [C]// Proc. ACM Siggraph 96. USA: ACM, 1996: 379-386.
- [4] Mark Harris, Anselmo Lastra. Real-Time Cloud Rendering[C]//Proc. Euro Graphics 01. USA: Computer Graphics Forum, 2001: 76-84.
- [5] 徐华勋, 赵龙, 肖全初. 云的动态实时仿真技术研究 与实现[J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 202 -206.
- [6] 许函. 基于粒子系统的动态云的实时模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [7] 蒋立辉, 董要颖, 庄子波. 基于体绘制的三维云可视化研究[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(5): 79-82,86.

(下转第 69 页)