

一种简化的流体方法快速仿真 大型三维云场景*

何晓曦^{1,2}, 陈雷霆¹, 朱清新¹

(1. 电子科技大学 虚拟现实技术工信部重点实验室, 成都 611731; 2. 电子科技大学成都学院, 成都 611731)

摘要: 提出了一种改进的立体云模拟方法, 用 Navier-Stokes 流体方程描述云的运动规律, 同时考虑大气运动条件下云的特性, 建立云的运动模型。在云的实时渲染方面, 基于太阳光照方向和天气状况提出了一种简单的光照模型, 大幅度地提高了云的渲染速度。此外, 使用改进的环状 Impostor 技术来提高大范围云层的渲染速度。基于上述理论模型, 利用实验室自主图形引擎开发了一套三维云仿真插件, 广泛应用于各种实时仿真和科技娱乐项目中。该方法绘制的云具有规模大、真实感强、渲染速度快的特点。

关键词: 三维云; 仿真; 粒子; 散射

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)06-2357-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.095

Simplified fluid method for fast simulation of large three-dimensional cloud scene

HE Xiao-xi^{1,2}, CHEN Lei-ting¹, ZHU Qing-xin¹

(1. Ministry Key Laboratory of Virtual Reality Technology, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. Chengdu Institute of UESTC, Chengdu 611731, China)

Abstract: This paper proposed an improved method for three-dimensional clouds simulation. It used Navier-Stokes equations to describe movement of the clouds, taking into account the characteristics of cloud under atmospheric conditions to establish cloud motion model. In real-time cloud rendering, it presented a simple illumination model based on the direction of the sun light and weather conditions, which greatly improved the rendering speed of the cloud. In addition, it used the improved ring Impostor technology to improve the rendering speed of large-scale clouds. With the independent graphics engine, it developed a stereo cloud plugin based on the method described in this paper, and applied it to various simulation systems and projects. The clouds generated by the method have large-scale, photorealistic and fast rendering features.

Key words: stereo cloud; simulation; particle; scattering

0 引言

云是构成天空的重要组成部分,没有云的人造户外场景会影响其真实效果。三维云的仿真技术被广泛应用在各种虚拟现实系统、工业仿真系统、飞行视景仿真系统中。由于云生成的物理过程复杂、形状不规则、变化实时,所以三维实时云仿真一直是一项具有挑战性的工作,从20世纪70年代末到现在,国内外许多研究人员一直致力于具有真实感云模型的研究。

1 相关工作

研究者对云的仿真工作主要集中在云建模和云渲染两个方面。

1998年, Dobashi 等人^[1]提出了云的元胞自动机模型,并且把该模型成功运用于生成有较好真实感的云的动画。该方法绘制的云的状态变化不具有连续性。

1983年, Reeves^[2]提出用粒子系统对模糊物体进行建模的方法。

1998年, Unbescheiden 等人^[3]利用粒子系统,从云的物理原理出发,结合纹理映射技术建立云的模型。该方法使用多面体较少时渲染的速度较快,使用多面体较多时渲染的速度较慢,其真实感也较差。

云是光与大气中的介质作用的结果,光在介质中传播会与介质发生吸收和散射作用。有研究者研究了吸收和散射光照技术,并运用在云的渲染方面。如 Nishita 等人^[4]对云的全局光照解决了多倍散射和天空光照的问题,但是该方法计算量较大,实时性不好。Max^[5]总结了用于体绘制的光谱模型,得到物理模型的公式,但是该方法中纹理数据量较大,需要消耗大量的纹理内存。

Harris 等人^[6]使用 Impostor 技术,利用帧与帧之间的相关性来加速云的渲染,以达到实时渲染场景的要求。但是这种方

收稿日期: 2011-09-08; **修回日期:** 2011-11-04 **基金项目:** 国家“863”计划资助项目(2007AA010407); 四川省科技支撑计划资助项目(2009GZ0017, 2010GZ0148)

作者简介: 何晓曦(1978-),男,贵州遵义人,博士研究生,主要研究方向为虚拟现实、群体行为仿真、增强现实(microwest@163.com); 陈雷霆(1966-),男,重庆人,教授,博导,博士,主要研究方向为计算机图形学、数字媒体技术、虚拟现实技术、数字图像处理; 朱清新(1953-),男,四川成都人,教授,博导,博士,主要研究方向为多媒体技术、生物信息学、计算运筹学。

法渲染的云的大小、位置和色彩都是固定不变的。

贺怀清等人^[7]对 Gardner 的椭圆模型作了改进,取得了较好的穿云效果,但缺乏对云的流动性和光照模拟。陆华兴^[8]、黄炳等人^[9]采用基于粒子系统的建模方法,结合云的运动规律和光照模型,获得较好的云真实感效果。唐兆等人^[10]解决了应用 Impostor 技术到 alpha 融合场景中所出现的问题,提高了云的渲染速度。但上述方法没有解决大规模三维云渲染时的真实感和流畅性问题。

本文研究了云的建模和渲染。在云的建模方面,基于 Navier-Stokes 流体方程,同时考虑大气运动中云的运动特性,建立云的运动模型。在云的渲染方面,改进了 Harris 的 Impostor 方法,用于加速云渲染,同时考虑到大气中云粒子与光的相互作用,建立了基于大气散射原理的云的光照模型。该方法在应用中满足了大规模云的真实感、流动性和渲染速度要求。

2 建立云模型

云的运动遵循大气运动的基本方程。单位质量空气的相对运动方程^[11]表示如下:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho} - 2\Omega v + g + F \quad (1)$$

其中: v 为速度矢量; ρ 为密度; p 为空气压强; Ω 为地球自转角速度; $\frac{\nabla p}{\rho}$ 为气压梯度力; g 为重力; $2\Omega v$ 为地转偏向力; F 为单位质量空气块的摩擦力。此式源于 Navier-Stokes 流体方程,考虑了单位空间云的速度变化率正比于所受的内力与外力的合力。

大气运动的连续方程^[11]表示如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (2)$$

其中: $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 为空气的密度变化率; $\nabla \cdot v$ 为速度散度。此式表明了单位体积的云密度变化率正比于该体积的通量。

在大气中,气压分布不均造成了气压梯度力,方向由高压指向低压,用 G 表示,其垂直分量 $G_y = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}$ 比其水平分量 $G_x = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$ 和 $G_z = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}$ 要大得多, G_y 和重力加速度始终处于平衡状态。一般在 100 km 以下的大气层内,空气块的摩擦作用可以忽略不计。地转偏向力为 $2\Omega v$,其中 $\Omega = 2\pi/24 \text{ h} = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$,通常情况下,最大速率不超过 200 m/s。大气压强 P 为 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$,地转偏向力与气压梯度力相差很大,可以忽略不计。

所以,简化后云的运动方程为

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho} \quad (3)$$

3 基于粒子的云层渲染方法

首先对空间区域进行网格划分,求解式(2)(3),得到每一个时间周期内云粒子的密度分布和速度矢量。同时,由于采用图形芯片处理通用计算算法已经成为可能,且可大大地提高运算速度^[12],因此可以通过在显卡上求解上述简化的流体方程式,详见文献[6,13]。

在使用粒子仿真真实物体时,往往粒子数越多,物体的真实度越高,但是复杂度也就越高,因此必须尽可能降低粒子的

渲染代价。Wang^[14]为了模拟云的蓬松效果,将各种类型云的形状抽象成 16 张纹理,并根据不同类型的云来选择合适的纹理映射到粒子上。本文采用文献[15]的方法,不使用大量粒子来模拟云层的真实感,而将 16 张基础纹理(图 1)随机地贴到少量的粒子上,通过粒子的移动来表现云层的流动性和真实感。16 张基础纹理表现的各类型云如图 2 所示。

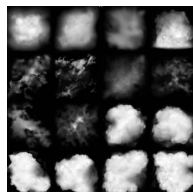


图1 16张基础纹理



图2 16张基础纹理表现各类型云

在实时模拟中,基于粒子系统的云建模方式其粒子数量庞大,往往造成帧率太低不能满足实时渲染的要求。本文用动态的 Impostor 技术来代替粒子云模型,大幅降低了每帧需要渲染的云粒子。Impostor 技术广泛地应用在大型自然场景仿真中加速图形的渲染^[14]。其原理是动态地生成纹理,并将纹理以 billboard 方式在合适的地方显示,代替原来的三维模型。对于复杂的模型来说,它能大大地减少三角形数量和向显卡中填充的像素数量。随着硬件技术的发展,现在大多数图形显示卡都支持硬件 RTT(render to texture)技术,这为 Impostor 的应用提供了方便。

Harris 等人^[6]对每一朵云动态地生成一个 Impostor 来加速云朵渲染。Wang^[14]在此基础上用面向相机的正八边形环来实现 Impostor,进一步减少了三角形的绘制数量,能更大程度地加速云朵的渲染。在此基础上,本文用正八边形的前四条边来代替整个八边形环。因为在背向相机的后四条边是不会被看见的,所以也不需要渲染,这样可以更加节省渲染时间。

大规模云层远景如图 3 所示。Impostor 技术加速绘制大规模云层如图 4 所示。



图3 大规模云层远景



图4 Impostor技术加速绘制大规模云层

4 云的光照模型

云是一种大气效果,其光照模型可以按照大气散射原理来模拟,但是严格按照大气散射效果来模拟的效率比较低。Dobashi 等人^[15]提出了利用云的单一散射光照模型进行云绘制的算法。单一散射光照模型只考虑某一方向上的光对单个粒子的散射(这个方向通常是指向视点的方向),运算量较小,但是精度不高。Harris 对以上光照模型进行了扩展,利用多重前向散射光照模型进行了云绘制。该模型考虑多个粒子的散射影响,并只考虑入射光前向很小立体角内的散射效应,压缩了运算量。

本研究在采用 Harris 云光照数学模型的基础上^[6],仅考虑太阳光作为光源,进一步减小了运算量。云光照数学模型表示

如下:

$$I_n = \begin{cases} g_{n-1} + T_{n-1} \times I_{n-1} & n \geq 2 \\ I_0 & n = 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中: I_n 为粒子 p_n 的光强度; T_n 为粒子 p_n 的透明度; g_{n-1} 为粒子 p_{n-1} 散射到 p_n 的光强度。式(4)表明,粒子 p_n 的光强是由粒子 p_{n-1} 散射到 p_n 的光强和光穿透粒子 p_{n-1} 处的光强(由 p_{n-1} 透明度决定)共同决定的。 g_n 计算式为

$$g_n = \gamma \times T_n \times A_n \times p(\omega, \omega') \times I_n / 4\pi \quad (5)$$

其中: $\gamma=0.09$ 为散射立体角; $T_n=80$ 为云粒子的透明度系数; $A_n=0.95$ 为光在云中传输的散射系数; $p(\omega, \omega')$ 为瑞利散射函数,即

$$p(\omega, \omega') = \frac{3}{4} \times (1 + \cos^2 \theta) \quad (6)$$

其中: θ 为光照方向 ω 和视点方向 ω' 之间的夹角,它决定了从光源发射方向散射到视点方向的光照强度。

大气散射的云光照模型如图5所示。式(5)的运算结果得到云粒子的光强度,仅反映了空间某处云粒子的亮度信息,在此基础上乘以一个基色因子,就可以得到任意颜色的彩云,如图6所示。



图5 大气散射的云光照模型

图6 彩色光照及阴影

5 实验与分析

实验条件:CPU 为 Pentium® Dual-Core E5300,内存为 2 GB,显卡为 NVIDIA GeForce 9800GT,运行环境为 VS 2005、DirectX 9.0c。云场景实时渲染实验结果如表1和图7所示。

表1 云场景实时渲染速度

云朵数	粒子数	无光照渲染速度/ms	有光照渲染速度/ms
1	7	3	4
15	104	49	54
100	510	117	128
300	556	223	263

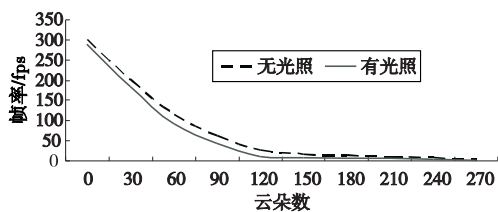


图7 云场景实时渲染帧率

通过 16 张纹理的组合能够模拟出层云、积云、高积云、乱层云等效果,如图1、2。在绘制大规模云层时(图3、4),由于使用了 Impostor 技术,当云朵数增加时,粒子数在云朵 100 的范围内正比于云朵数;当云朵数大于 100,粒子数不会再进一步增加,而限定在 550 左右的阈值,离视点较远的云朵都用 Impostors 替代了,因而不会对帧率造成太大的影响。云的光照计算速度取决于粒子数量(图5、6)。当云朵数在 100 以内,粒子数成正比增加,光照计算时间也相应陡增;当云朵数大于 100,

粒子数稳定,光照计算时间也相应稳定了。

6 结束语

本文在对 Harris、Wang 等人的云建模和渲染方法进行总结的基础上,提出了一种改进的三维实时云建模和渲染方法,该方法不仅适用于云的仿真,对于雾、雨、雪等大气现象也一样适用,通过扩展还可以将其应用于生成火、烟等特殊效果。实验结果表明,与已有的方法相比,该方法的渲染效果真实感和实时性良好,适用于较大场景的渲染系统,如飞行视景仿真系统。

后续工作还可从以下方面进行改进:a)进一步实现云彩的生成和消散过程;b)增加云朵的实时阴影,以进一步增强云的真实感。

参考文献:

- [1] DOBASHI Y, KANEDA K, YAMASHITA H, *et al.* A simple, efficient method for realistic animation of clouds[C]//Proc of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York:ACM, 2000:19-28.
- [2] REEVES W. Particle systems: a technique for modeling a class of fuzzy objects[J]. *Computer Graphics*, 1983, 17(3):359-376.
- [3] UNBESCHIEDEN M, TREMBILSKI A. Cloud simulation in virtual environments[C]//Proc of the Uirtual Reality Annual International Symposium. Washington DC:IEEE Computer Societty, 1998:98-104.
- [4] NISHITA T, DOBASHI Y, NAKAMAE E. Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light[C]//Proc of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York:ACM, 1996:379-386.
- [5] MAX N. Optical models for direct volume rendering[J]. *IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics*, 1995, 1(2):99-108.
- [6] HARRIS M J, LASTRA A. Real-time cloud rendering[J]. *Computer Graphics Forum*, 2001, 20(3):76-84.
- [7] 贺怀清,刘浩翰,刘金星,等.一种改进的立体云模拟方法[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(10):2620-2623.
- [8] 陆华兴.云的建模与渲染技术[J]. *飞机设计*, 2009, 29(5):64-68.
- [9] 黄炳,陈俊丽,万旺根.飞行仿真中三维云场景的渲染[J]. *上海大学学报:自然科学版*, 2009, 15(4):342-345.
- [10] 唐兆,邹平波.三维实时云建模与渲染在工业仿真中的应用[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(8):1051-1055.
- [11] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. *天气学原理与方法* [M]. 3 版. 北京:气象出版社, 2000.
- [12] HARRIS M J, COOMBE G, SCHEUERMANN T, *et al.* Physically-based visual simulation on graphics hardware[C]//Proc of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware. Switzerland:Eurographics Association Aure-La-Ville, 2002:109-118.
- [13] WU En-hua, LIU You-quan. General purpose computation on GPU [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(5):601-612.
- [14] Wang Ni-niane. Realistic and fast cloud rendering[J]. *Journal of Graphics Tools*, 2004, 9(3):21-40.
- [15] DOBASHI Y, KANEDA K, HAMASH IMA H, *et al.* A simple, efficient method for realistic animation of clouds[C]//Proc of the 21th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York:ACM Press, 2000:19-28.