

云的真实感模拟技术综述

邱 航 杨 珂 陈 瑜 陈雷霆

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

摘 要 云作为自然场景的一种重要组成元素,其形状不规则、物理形成过程复杂,因此很难实现实时绘制,云场景真实感模拟已成为计算机图形学中的热点和难点之一。综述了二十多年来云场景真实感模拟技术的发展情况,分别从云的建模、动态模拟、光照效果模拟等几个方面对该领域的研究进展做了比较深入、全面的分析,介绍了典型方法的基本原理和优缺点。最后对一些具有代表性的模拟方法进行了比较和总结,并对未来发展趋势进行了展望。

关键词 云场景,真实感模拟,粒子系统,元细胞自动机,体绘制,双向反射分布函数

中图法分类号 TP391 **文献标识码** A

Survey on Realistic Simulation of Cloud

QIU Hang YANG Ke CHEN Yu CHEN Lei-ting

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract Cloud is one of the nature elements that is difficult to render in real-time due to its peculiar microstructures and complex physical process of formation. Realistic simulation of cloud is one of the challenging topics in computer graphics. A comprehensive survey on realistic simulation of cloud in recent twenty years was presented, with a detail introduction to the modeling, dynamic simulation and light scattering effect techniques of cloud. Some fundamental principles, advantages and disadvantages of the typical methods were introduced and analyzed. Finally, some typical simulation methods were compared and summarized in detail, some key research issues that need to be further researched were pointed out.

Keywords Cloud scene, Realistic simulation, Particle system, Cellular automaton, Volume rendering, Bidirectional reflectance distribution function

1 引言

云是一种常见的大气现象,模拟其真实感在虚拟战场、飞行仿真、游戏动漫、影视特技等领域有着重要的应用。由于云没有确定的表面和边界,形成的物理机制复杂,且其特征不断变化,因此云场景的真实感建模与绘制一直被视为计算机图形学中最具挑战的课题之一。

二十多年来,研究人员在云的真实感模拟领域提出了许多新方法,在模拟效率、真实感等方面取得了较大的进展。本文分别从云的建模技术、动态特性模拟以及光照效果模拟等几个方面,对该领域的发展作了一个较全面的综述,以期对本领域研究人员有所裨益。

2 云建模技术

云建模的目的是要表述云的形态特征,建模的过程需要解决如何在计算机中产生用于描述云外形的数据,以及如何存储这些数据等诸多问题。

从云产生的物理机制来看,它是悬浮在空气中的大量小水滴和冰晶共同组成的可见聚集体^[1],其分布广泛,形态随时

间不断变化,具有不规则性。云的复杂内部结构以及无确定表面、边界的特性导致传统造型手段难以适用。目前,国内外针对云的外形建模大体上采用 3 种类型的方法,即数值模拟方法、启发式方法和混合式方法。

2.1 数值模拟方法

数值模拟方法以云形成的物理过程为出发点,通过选取不同的数值计算模型生成云数据。

1984 年, Kajiya 等^[2]采用积云对流(cumulus convection)数值模型,通过求解简单大气流体动力学方程组,得到 3D 网格上液态水混合比率,将其作为云的浓度分布数据,利用光线跟踪算法绘制出云效果。该方法较为复杂,同时受当时硬件条件限制,云的模拟尺度较小。

2002 年文献^[3,4]利用稳定流(stable fluid)^[5]解决了在网格上进行流体模拟时稳定性较差的问题,通过加入涡旋约束力^[6]补偿了计算中存在的数值耗散。Harris 等^[7,8]采用更为优化的热力学方程,避免了冗余计算。为了模拟大规模云系,2006 年 Dobashi 等^[9]优化了大气流体动力学方程组,在极坐标网格下进行求解,模拟出全球尺度的云系。

近些年,为了提高模拟效率,一些学者对数值模型进行了

到稿日期:2010-07-04 返修日期:2010-12-17 本文受国家 863 项目(2007AA010407),航空基金项目(20080580005)资助。

邱 航(1978—),男,博士生,讲师,主要研究方向为计算机图形学,E-mail: qiuhan@uestc.edu.cn;杨 珂(1988—),男,硕士生,主要研究方向为计算机图形学;陈 瑜(1987—),男,硕士生,主要研究方向为虚拟现实技术;陈雷霆(1966—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为虚拟现实技术、计算机图形学。

简化。Wang 等^[10]采用简化方案模拟积云,将三维空间分为竖直方向的一维空间和水平方向的二维空间,并分别进行处理,还将复杂的变量转换为常量,以降低计算开销。2008 年, Wang 等^[11]采用粒子系统,通过近似物理的计算模型控制水蒸气粒子上升运动,用粒子生命期控制其凝聚于体素网格,然后在体素网格上计算相变,得到云的形态数据。文献^[12]采用基于概率天气模型(Probabilistic Weather Model)生成水蒸气粒子的方案,将云粒子的上升轨迹简化为一个指数方程。

以上方法中,云的形态由大量专业参数间接控制,难以满足用户自定义外形的建模需要。2008 年, Dobashi 等^[13]提出了基于反馈控制的积状云模拟方法,用户首先勾勒出云的 2D 轮廓,程序以此生成云的 3D 外形,然后依据 3D 外形和当前形态的差距,采用反馈机制控制物理参数,最终模拟出既满足用户勾勒外形又符合流体特性的积状云。

考虑到通过求解大气流体动力学方程组获取云形态数据的方法计算代价较高,一些学者选用了更为简化的计算模型。1992 年, Nagel 等^[14]提出将细胞自动机(Cellular Automaton, CA)用于模拟云的生成。Dobashi 等^[15,16]对这一思想进行了扩展,他们通过一系列的布尔运算,将所得体素网格上的布尔变量作为云的形态数据,通过对该数据进行平滑处理,采用 splatting 方法绘制出了真实感较强的云。由于 CA 方法中每个网格只含有少量布尔量,且不再完全基于大气流体动力学过程,其存储空间和计算代价都较求解偏微分方程组要小很多。

耦合映像格子(Coupled Map Lattice, CML)是 CA 的扩展,由于采用连续变量,能较好地模拟粒度更细的物理过程,这一特性使其也成为一种有效的云建模和动态模拟方法。Yanagita 等^[17]提出了基于 CML 的云建模和动态模拟方法,但该方法的目的不是用于产生逼真的云图像,而是以 2D 的形式展现云的形成。文献^[18]采用 CML,通过控制上升气流的强度、调节伯纳德单元(Benard-Cell)的大小,最终模拟出了不同类型的云。

2.2 启发式方法

与数值模拟方法不同,启发式方法采用分形、程序化建模、定性模拟(Qualitative Simulation)、随机过程等手段,旨在建立视觉上逼真的云外观形态,其最大的优势在于计算代价小且云的形态不受物理规律制约。

2.2.1 基于分形的方法

考虑到云具有自相似性,一些学者将分形技术引入到云建模中。Voss^[19]采用高斯分形技术和分形几何模拟了云和雪花。文献^[20]用分形布朗运动生成了 2D 云,并用 GPU 优化了建模过程。

2.2.2 基于 metaball 的方法

metaball 是一种常见的柔性对象建模技术^[21],单个 metaball 包含中心坐标、浓度、有效半径等信息,将一组 metaball 相互叠加,可得到具有复杂外观的模型。

1996 年, Nishita 等^[22]采用 metaball 构造了云的基本外观,通过分形算法增加细节特征,模拟出了云的底部平坦、顶部不规整的外形特点。Dobashi 等^[23]基于卫星云图,通过放置并调节 metaball 的半径和浓度,使其逐渐逼近原始卫星云图,但该方法不能准确模拟云的内部结构。

2.2.3 基于粒子系统的方法

考虑到云的不规则外观特征,粒子系统也成为一种可行

的云建模方法。

1983 年, Reeves 等^[24]提出了用于模拟云等模糊物体的粒子系统。1997 年, Neyret 等^[25]使用定性模拟的方式,在云团表面不断增加云粒子,同时为云粒子加入局部小规模表面细节,从而建立了云表面的模型。1998 年,文献^[26]把粒子点云简化为多边形,并配合 90% 高透明度的高斯噪声贴图,建立了云的模型。Harris 等^[27]采用基于贴图粒子的静态云建模方法,利用动态 impostor 技术实现了云的实时绘制。文献^[28]则结合分形和粒子系统,建立了符合高斯分布的云团粒子系统。

为了满足交互式快速建模以及模型简化的需要,2003 年 Wang^[29]实现了艺术驱动(Artist-driven)的云模拟。该方法将云的形状抽象成 16 张纹理,通过人工摆放盒子来生成云的大致轮廓。此后,许多学者^[30,31]采用这一方法来构造云。在 Wang^[29]的工作基础上,文献^[32]加入了一定自动化的云生成,减少了原设计中对美工的依赖,而文献^[33]利用 GPU 对 Wang 所提出的方法进行了加速。

2.2.4 基于纹理实体的方法

基于纹理实体(Textured Solids)的方法是一种生成逼真云纹理,并将其映射到确定表面的建模技术。

1985 年, Gardner^[34]利用谱合成函数生成云的纹理,将所得纹理映射到 2D 平面和椭球表面,通过调整分形模型的参数、载体透明度模型的参数,最终生成了云的静态图片。2001 年, Elinas 等^[35]对 Gardner 的方法^[34]进行了扩展,将谱合成产生的纹理用柏林噪声替代,并对透明度计算方式做了更适应硬件的修正。

2.2.5 基于过程噪声的方法

基于过程噪声(procedural noise)的方法是以噪声为基础,通过对其施加一系列操作得到随机但却连续的云三维浓度分布,从而实现云建模。

Lewis^[36]用椭球和三维噪声模拟了云。Ebert 等^[37]在利用程序化噪声建立云的三维浓度方面做了大量研究。在宏观尺度上,他们通过隐函数确定云的范围;在微观尺度上,通过程序化噪声及各种滤波操作提供细节,最终产生出形态逼真的云。文献^[38]利用 GPU 对 Ebert 的方法^[37]进行了加速。2004 年, Bouthors 等^[39]采用分形技术,使隐函数表面能自动生成更多细节层次。文献^[40]根据用户绘制的 2D 草图(sketch),快速生成复杂的 3D 表面网格作为云的大体形态,并用文献^[41]的方法仅为表面内一定深度的区域填充 3D 纹理,从而节省了大量的开销。

3 云的动态模拟技术

自然界中的云并不是静止的,其运动极其复杂,涉及到大气流动、水的蒸发和凝结以及所伴随的热量交换。虽然大气物理学、云物理学对这一过程进行了深入的研究,但在计算机图形学领域要选取一个合适的模型,能逼真、快速地模拟云的动态特性却非常困难。从目前国内外研究现状看,云的动态模拟工作相对较少,采用的技术主要分为 3 种:基于大气流体动力学的模拟、基于 CA 和 CML 的模拟以及基于现象学的模拟。

3.1 基于大气流体动力学的模拟

基于大气流体动力学的模拟方法是看云作为自由大气中

热力过程与动力过程的外部表现,通过不同精度的计算模型展现云的动态效果。在大气流体动力学中,云的动态特性可归结为运动和状态变化两个方面,因此采用运动方程组、热力学方程组及水汽方程是准确模拟云动态特性的最为直接的手段。

云在通常情况下被视为不可压缩流体,其运动常用不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程组描述:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

式(1)为动量守恒方程,右边 4 项表述了流体的平流传送、压力梯度加速、扩散(或粘度力)以及浮力等其他外力作用。式(2)保证速度场无散,为质量守恒方程。

云的状态变化涉及到能量守恒,体积、压强、温度间的关系,以及湿空气气块中的水汽含量变化。这些过程可以由热力学方程(热流量方程和状态方程)及水汽方程来进行表述。

Kajiya 等^[2]选用了一系列简单方程,同时作了大量硬性简化,所模拟的结果不够细致。Harris 等^[7,8]选用了更为精确的物理公式,考虑了数值计算过程中能量耗散的补偿,所得的动态效果更加准确。

文献[9]针对地球尺度的云模拟优化了 Navier-Stokes 方程组,模拟出全球范围的云系动态变化。刘世光等^[42,43]提出了纹理漂移,在粗糙的网格上计算不考虑粘性力的大气流体动力学方程组,从而获得速度场,并使 3D 柏林噪声在其作用下运动变化。

在广阔的视景中,云的运动通常不会十分剧烈。因此,为了保证绘制效率,文献[7]不再逐帧进行动态模拟,而是以保证绘制速率为前提,根据硬件性能来异步地进行动态模拟。然而基于大气流体动力学的方法很难从根本上解决计算量大的问题。另外,基于大气流体动力学的方法涉及大量的物理参数,通过对其调控来控制动态也是很困难的。

3.2 基于 CA 和 CML 的模拟

基于 CA 和 CML 的动态模拟方法不再严格遵循大气流体动力学定律,而是将大气流体动力学中的主要因素通过一些规则表现出来,从而模拟云的动态特性。

CA 是一种离散的动力系统模型,对模拟复杂系统非常有效,在可计算理论、数学、物理学等领域有着广泛的应用。1992 年,文献[14]利用一组规则描述云的动态特性,模拟了云生成、聚集的趋势。然而该方法无法展现消散等其他动态特性。Dobashi 等^[15]通过改变已有的演化规则,使变化趋向于朝水平面上固定方向发展,模拟了云形成时被风吹动的情况。同时引入了控制消散的状态变量及相应规则模拟云的消散。然而该方法会导致云的生成和消散过于频繁,降低了真实感。在随后的工作中^[16],他们引入了基于概率的变化规则,通过隐函数控制概率的分布,模拟云的生成和消散,而随简单风场运动的效果也由新的更直观的规则表示。文献[44]考虑了云的蒸发概率,同时加入边界约束,减少人工干预和突然变化带来的人工痕迹。Shen 等^[45]将模拟空间变为多个网格块,以减小计算量。皮学贤^[46]为了将复杂风场用于 CA,提出了基于距离倒数权值的分裂与重构。姚海等^[47]增加带有碰撞分析的风力函数,用于控制云的运动。

CML 作为 CA 的一种扩展,也被运用于模拟云的动态特

性。Miyazaki 等^[18]在考虑粘稠度和压力作用下状态参数的水平对流、水汽扩散、热扩散、热浮力、相变等因素的情况下,利用 CML 模拟出了种类丰富的云及对应动态变化。

3.3 基于现象学的模拟

基于现象学的云动态模拟方法不再考虑复杂的物理过程,而是采用一些更为直接的方式实现动态效果。

1997 年,文献[25]采用随机过程模拟云的运动,通过启发式方法控制云粒子的生成,从而模拟出云形成的趋势。Dobashi 等^[23]通过关键帧技术,基于一系列图像建模,对云进行动态模拟。该方法所得的动态在宏观上是准确的,然而却不能模拟云内部的复杂运动。2003 年,Wang^[29]采取了控制粒子透明度的方案来表现云的生成和消失,对于确定的一个云团的所有粒子,通过由内向外减小透明度或由外向内增加透明度,模拟出云团的生成和消散,但本质上该方法产生的云是静态的。

4 云的光照效果模拟技术

在自然界中,云所呈现的颜色随视点和光源位置的变换而不同,逼真的光照效果有助于提高云场景整体真实感。

云的光照效果模拟通常包括光照模型的建立、模型求解方法的选择以及绘制算法的设计 3 个方面。其中,光照模型描述了光能与云粒子间的相互作用;光照模型求解方法对光照模型中的函数进行近似模拟,使其能够用于绘制;而绘制算法最终将云数据绘制到屏幕上。

4.1 光照模型

对光照模型的研究大致经历了两个阶段,即云的一般光照效果模拟和特殊光照效果模拟。

云的一般光照效果包括扩散(diffusion)、银边(silver line)等常见现象。要模拟这些现象,需要使用基于光能传输的光照模型,其常用表达形式为

$$\frac{dL(\vec{x}, \vec{w})}{ds} = -K(\vec{x})L(\vec{x}, \vec{w}) + K_s(\vec{x}) \int_{4\pi} P(\vec{x}, \vec{w}, \vec{w}')L(\vec{x}, \vec{w}')d\vec{w}' \quad (3)$$

该表达式的右边是由输入光源 $L(\vec{x}, \vec{w})$ 以及包含相位方程 $P(\vec{x}, \vec{w}, \vec{w}')$ 的散射模型组成。等号右边的两项分别代表了云粒子对光的衰减和增强作用。对模型两边积分后可以得到:

$$L(D, \vec{w}) = L(0, \vec{w})T(0, D) + \int_0^D g(s)T(s, D)ds \quad (4)$$

其中,

$$g(s) = K_s(\vec{x}(s)) \int_{4\pi} P(\vec{x}, \vec{w}, \vec{w}')L(\vec{x}(s), \vec{w}')d\vec{w}' \quad (5)$$

早在 1982 年,Blinn^[21]就提出了基于密度场表达的单重散射模型和三阶以上多重散射模型,用其模拟云的扩散效果。Nishita 等^[22]在多重散射光照模型中增加了天空散射光作为输入光源,从而使云的模拟效果更加明亮真实。2000 年, Dobashi 等^[16]考虑了天空散射光并模拟了丁达尔效应,但其使用的是单重散射模型,云的绘制效果不够逼真。2002 年, Dobashi 等^[48]为了模拟大气效果,利用一个环境光项代替光照模型中的多重散射,减少了计算开销。Harris 等^[7-8,27]采用包含瑞利方程的二阶多重散射模型,降低了绘制时的计算量。但由于瑞利方程过于简化,导致绘制质量下降。

为了模拟出诸如宝光、暴雨区域的彩虹、卷云中的光晕等更为复杂的特殊光学现象,2004年,Riley等^[50]在多重散射光照模型中近似模拟了米散射的后向散射部分,并将其存储于一个纹理中。同时,他们使用瑞利散射构造了用于绘制天空的模型,最终得到了真实感较强的云效果。但该方法速度较慢,难以满足实时应用的需要。

Bouthors等^[51,52]对Riley等^[50]的工作进行了拓展,使用有效相位方程来模拟米散射方程,因此较好地模拟了“宝光”等特殊效果。2007年,刘世光^[42]为了模拟宝光现象,仍采用了有效相位方程,并且光照模型中考虑了大气衰减的效果。

4.2 光照模型求解方法

常见的光照模型求解方法包括球谐函数、扩散方程、蒙特卡罗有限元方法、线性积分方法、双向反射分布函数方法。

(1) 球谐函数(Spherical Harmonic)方法。球谐函数可以用于近似模拟复杂的函数,其正交基的存储形式便于预计算。1984年,Kajiya等^[2]使用此方法模拟模型中的积分项,以便于求解,但其绘制速度不够理想。

(2) 扩散方程(diffusion function)方法。由于光照模型中的二次散射可以近似为一个扩散方程,因此用稳定有限差分的方法进行求解。早在1995年,Stam等^[53]就运用了这一方法。考虑到扩散方程只能较好地模拟云中浓度较高的核心区域的多重散射,为了求解云中低浓度区域与边界区域的光照模型,Max等^[54]使用扩散方程模拟云的核心区域,采用线积分的方法求解边界区域的阳光直射效果以及低浓度区域各向异性多重散射模型。

(3) 蒙特卡罗有限元方法。该方法通过离散化积分域求解模型,常在光线跟踪算法中使用。1996年,Nishita等^[22]使用这一方法求解光照模型,同时利用前向散射特性,筛选出部分对当前云粒子光强贡献高的积分路径以提高效率。

(4) 线性积分方法^[48-52,55,56]。该方法最大的特点是先需要计算光源到体素间的光强积分。Harris^[7,8,27]利用云的前向散射特性对多重散射模型本身积分项进行变换后,使用线性积分的方法求解模型,并与GPU相结合实现了实时绘制。皮学贤^[46]也采用了线性积分的思路进行三阶多重散射模型求解,在处理散射方程时,使用与Riley^[50]类似的思路来模拟相位方程的角度分布。

(5) 双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)方法。该方法是辐射度中高效求解光照模型的方法,适合求解模型表面的辐射度。2008年,Bouthors等^[41]使用了这种方法求解含有面片的云表面光照模型,但其难以模拟云的内部光照情况。

4.3 绘制方法

常见的云绘制算法主要包括光线投射算法(ray casting)、基于纹理切片(texture slicing)以及基于splatting的体绘制技术。

早期云的绘制技术多采用能较好地表现真实感的光线投射算法,其典型代表是光线跟踪算法^[21,22,53,54],但这类方法难以满足实时性较高的应用的需要。

随着GPU的出现,基于硬件加速的高效绘制算法成为一个重要的研究方向。Cabral等^[57]提出了基于纹理切片的体绘制技术,它是一种基于对象空间(object-based)的方法,非常适合GPU加速。1998年,Behrens等^[58]通过预计算光

源阴影纹理来快速绘制体积云。Harris^[7,8]同样采样两步法,其光源方向上的光线衰减存储在一个被称为OLV(oriented light volume)的纹理数组中,整个过程利用GPU加速,达到了较好的实时性。针对两步法中计算光线衰减时会产生临时数据的缺陷,2004年Miyazaki等^[49]提出了基于SVS(Shadow View Slice)的体绘制方法,其本质是对SVS混合生成最终图像,并且在混合的同时计算每一个SVS的衰减系数,因而在绘制过程中不产生临时体数据。

基于纹理切片的体绘制技术适用于绘制以网格表示的云数据,而对于粒子系统生成的不规则点数据或由网格数据转化而成的以metaball表示的数据,则多采用基于splatting的体绘制技术。该方法仍采用两步法的思路,但计算光线衰减时先将每一个3D的体素或metaball通过投影的方式转换成2D的阴影纹理^[59]。

2000年,Dobashi等^[16]对metaball数据进行绘制时,采用对metaball相对光源排序以及嵌入billboard的方法生成阴影纹理,并使用它生成最终图像。2004年,Liao等^[44]将网格数据转化成metaball,预计算SRT(Shadow Relation Table, SRT)存储metaball相对光源的排序,使用MLTDB(Metaball Lighting Texture Database, MLTDB)生成视线方向上的最终图像。将散射光照的复杂计算转化为简单的纹理查表过程。2009年Dobashi等^[56]采用分片体绘制与splatting技术渲染相应的云数据。对各等级的云数据,根据各种视角及太阳位置的光照强度进行预计算和预存储,供绘制时选用。

为了进一步提高绘制速度,Wang^[29]使用了纹理混合的方法绘制云。该方法基于艺术驱动的近似模拟光照效果,具有良好视觉效果,速度较快,但光照模型限制了其真实感的提高。文献[33]也采用了类似的方法,并且使用bitonic算法对面片排序,取得了较好的绘制速度,该方法可以模拟大规模云系,但由于光照模型过于简单,渲染效果比较欠缺。图2给出X云绘制效果图。

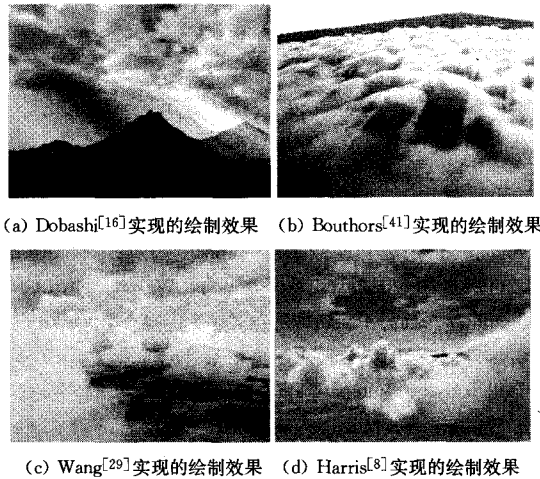


图2 X云绘制效果图

结束语 经过二十多年的研究,云的真实感模拟技术得到较大发展。但由于云本身的复杂性以及应用需求的不断提高,云场景真实感模拟仍是计算机图形学中最具挑战性的课题之一。

我们从建模方法、动态模拟、光照效果、性能等几个方面,对具有代表性的云真实感模拟方法进行了总结与比较,如表1所列。

表1 典型方法总结与比较

文献	建模方法	动态模拟	光照模拟			性能	
			散射模型	求解方法	绘制方法	模拟尺度	效率
[2]		流体力学	3	球谐函数	光线跟踪	小	低
[7,8]	数值模拟	流体力学	2	线性积分	纹理切片	中	较高
[16]		CA	1	线性积分	Splatting	中	低
[18]		CML	1	线性积分	splatting	中	低
[22]		×	3+	蒙特卡罗	光线跟踪	小	低
[29]		现象学	艺术驱动	—	纹理混合	中	高
[41]	启发式方法	×	3+*	BRDF	面绘制	中	中
[50]		×	3+*	线性积分	纹理切片	小	中
[51,52]		×	3+*	线性积分	面绘制	中	中
[56]		×	1	线性积分	混合绘制	大	中

注:散射模型中数字代表模型模拟的多重散射次数,1为单重散射,3+为3阶以上散射,*代表模型中使用了米散射的近似函数。

由于云自身的复杂性,使其无论在造型、存储还是绘制上都存在着困难,因而目前国内外对云景真实感模拟的研究都各有侧重,难以做到面面俱到。由表1可以看出,没有一种模拟方法能够在各方面都优于其他模拟方式。

从目前研究进展看,仍存在一些问题有待进一步探索:

(1) 由于许多图形应用如飞行仿真、游戏等对大规模自然场景真实感和实时性的要求,云的真实感实时绘制仍将是研究的重点和难点。在现有的研究成果中,有些可以提供逼真的渲染质量,但速度远远达不到实时交互的要求;有些采用了运算简化、GPU加速等策略,保证了速度的要求,但渲染质量受到影响。如何有效地在真实感和实时性之间找到一个合理的平衡点,还需要进一步研究。

(2) 云存在着复杂的动态特性,现有方法大都只能模拟云的生成、消散等简单运动过程。如何快速、逼真地展现云在复杂环境下的变化,是未来的一个研究方向。

(3) 自然界中,云的种类繁多、形态各异,目前的研究主要针对层云、积云,具有较大的局限性。对不同种类云的模拟,在气象仿真、科学可视化等领域具有重要的意义。

参考文献

[1] 章澄昌. 飞行气象学[M]. 北京:气象出版社,2000:8-10

[2] Kajiya J T, Herzen B P V. Ray tracing volume densities[C]// Proceedings of ACM Siggraph'84. 1984:165-174

[3] Overby D, Melek Z, Keyser J. Interactive Physically-based Cloud Simulation[C]// Proceedings of the 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society Press, 2002:469

[4] Miyazaki R, Dobashi Y, Nishita T. Simulation of cumuliform clouds based on computational fluid dynamics[C]// Proceedings of Eurographics'02. Switzerland: Eurographics Association Press, 2002:405-410

[5] Stam J. Stable fluids[C]// Proceedings of ACM Siggraph'99. New York: ACM Press, 1999:121-128

[6] Fedkiw R, Stam J, Jensen H W. Visual simulation of smoke[C]// Proceedings of ACM Siggraph'01. New York: ACM Press, 2001:15-22

[7] Harris M J, Baxter W V, Scheuermann T. Simulation of cloud dynamics on graphics hardware[C]// Proceedings of the ACM Siggraph/Eurographics Conference on Graphics Hardware. New York: ACM Press, 2003:92-101

[8] Harris M J. Real-time cloud simulation and rendering [D]. Chapel Hill: University of North Carolina, 2003

[9] Dobashi Y, Yamamoto T, Nishita T. A Controllable Method for Animation of Earth-scale Clouds[C]// Proceedings of CASA'06. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2006:43-52

[10] Wang B, Peng J L, Kwak Y, et al. Efficient and realistic cumulus cloud simulation based on similarity approach[C]// Proceedings of the International Symposium on Visual Computing'07. Berlin: Springer-Verlag, 2007:781-791

[11] Wang B, Peng J L, Kuo C. -C J. Cumulus cloud synthesis with similarity solution and particle/voxel modeling[C]// Proceedings of the International Symposium on Visual Computing'08. Berlin: Springer-Verlag, 2008:65-74

[12] Grudzinski J, Debowski A. Clouds and atmospheric phenomena simulation in real-time 3D graphics[C]// Proceedings of Model-based Imaging, Rendering, Image Analysis and Graphical Special Effects (MIRAGE'07). Berlin: Springer-Verlag, 2007:117-127

[13] Dobashi Y, Kusumoto K, Nishita T, et al. Feedback control of cumuliform cloud formation based on computational fluid dynamics[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3)

[14] Nagel K, Raschke E. Self-organizing criticality in cloud formation[J]. Physica A, 1992, 184(4):519-531

[15] Dobashi Y, Nishita T, Okita T. Animation of clouds using cellular automaton[C]// Proceedings of Computer Graphics and Imaging'98. Anaheim: IASTED/ACTA Press, 1998:251-256

[16] Dobashi Y, Kaneda K, Yamashita H, et al. A simple, efficient method for realistic animation of clouds[C]// Proceedings of ACM Siggraph'00. New York: ACM Press, 2000:19-28

[17] Yanagita T, Kaneko K. Modeling and characterization of clouds dynamics[J]. Physical Review Letters, 1997, 78:4297-4300

[18] Miyazaki R, Yoshida S, Dobashi Y. A method for modeling clouds based on atmospheric fluid dynamics[C]// Proceedings of Pacific Graphics'01. Washington DC: IEEE Computer Society Press, 2001:363-372

[19] Voss R. Fourier synthesis of gaussian fractals; 1/f noises, landscapes, and flakes[C]// Proceedings of ACM Siggraph'83. New York: ACM Press, 1983:1-21

[20] 刘峰. GPU加速的云的生成和动态模拟[D]. 杭州:浙江大学, 2005

[21] Blinn F J. A generalization of algebraic surface drawing [J]. ACM Transactions on Graphics, 1982, 1(3):235-256

[22] Nishita T, Dobashi Y, Nakamae E. Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light[C]// Proceedings of ACM Siggraph'96. New York: ACM Press, 1996:379-386

[23] Dobashi Y, Nishita T, Yamashita H. Using metaballs to modeling and animate clouds from satellite images[J]. The Visual Computer, 1999, 15(9):471-482

[24] Reeves W T. Particle systems-a technique for modeling a class of fuzzy objects[J]. ACM Transactions on Graphics, 1983, 2(2):91-108

[25] Neyret F. Qualitative simulation of convective clouds, formation and evolution[C]// Proceedings of Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation. Berlin: Springer-Verlag, 1997:113-124

[26] Unbescheiden M, Trembilski A. Cloud simulation in virtual en-

- vironments[C]//Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium, Washington, DC; IEEE Computer Society Press, 1998; 96-104
- [27] Harris M J, Lastra A. Real-time cloud rendering [C]// Proceedings of Eurographics '01, Switzerland; Eurographics Association Press, 2001; 76-84
- [28] 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): 342-34
- [29] Wang N. Realistic and fast cloud rendering [J]. Journal of Graphics Tools, 2004, 9(3): 21-40
- [30] Rana M Z, Sunar M S, Hayat M N N. Framework for real time cloud rendering[C]// Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, Washington, DC; IEEE Computer Society Press, 2004; 56-61
- [31] 佟志忠. 基于物理的飞行模拟流体动画仿真技术及加速策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
- [32] Hu X Y, Sun B, Liang X H. An improved cloud rendering method[C]// Proceedings of the International Conference on Image and Graphics, Washington DC; IEEE Computer Society Press, 2009; 853-858
- [33] 李纲, 李辉. GPU 上的实时三维云仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7511-7514
- [34] Gardner G Y. Visual simulation of clouds[C]// Proceedings of ACM Siggraph '85, New York; ACM Press, 1985; 297-304
- [35] Elinas P, Sturzlinger W. Real-time rendering of 3D clouds[J]. Journal of Graphics Tools, 2000, 5(4): 33-45
- [36] Lewis J P. Algorithms for solid noise synthesis [C]// Proceedings of ACM Siggraph '89, New York; ACM Press, 1989; 263-270
- [37] Ebert D S, Musgrave F K, Peachey D, et al. Texturing & modeling—a procedural approach(3rd ed)[M]. San Francisco; Morgan Kaufmann, 2003
- [38] Schpok J, Simons J, Ebert D S, et al. A real-time cloud modeling, rendering, and animation system[C]// Proceedings of the ACM Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation, New York; ACM Press, 2003; 160-166
- [39] Bouthors A, Neyret F. Modeling clouds shape[C]// Proceedings of the Eurographics '04 Short Presentation, Switzerland; Eurographics Association Press, 2004
- [40] Wither J, Bouthors A, Cani M P. Rapid sketch modeling of clouds[C]// Proceedings of the Eurographics Workshop on Sketch-based Interfaces and Modeling, Switzerland; Eurographics Association Press, 2008
- [41] Bouthors A, Neyret F, Max N, et al. Interactive multiple anisotropic scattering in clouds[C]// Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, New York; ACM Press, 2008; 173-182
- [42] 刘世光. 大气现象的真实感建模及绘制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006
- [43] 刘世光, 柴佳伟, 闻媛. 三维动态云快速模拟的新方法[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(9): 1417-1423
- [44] Liao H S, Ho T, Chuang J, et al. Fast rendering of dynamic clouds[J]. Computers & Graphics, 2005, 29(1): 29-40
- [45] Shen H L, Yin Y, Li Y J. Real-time dynamic simulation of 3D cloud for marine search and rescue simulator[C]// Proceedings of the 7th ACM Siggraph International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry, New York; ACM Press, 2008; 1-5
- [46] 皮学贤. 大规模自然场景建模与绘制[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006
- [47] 姚海, 鲍劲松, 金焯. 基于元胞自动机的云层实时模拟[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(11): 2946-2950
- [48] Dobashi Y, Yamamoto T, Nishita T. Interactive rendering of atmospheric scattering effects using graphics hardware[C]// Proceedings of the ACM Siggraph/Eurographics Conference on Graphics Hardware, New York; ACM Press, 2002; 99-107
- [49] Miyazaki R, Dobashi Y, Nishita T. A fast rendering method of clouds using shadow-view slices[C]// Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Imaging (CGIM' 04), Anaheim; ACTA Press, 2004; 93-98
- [50] Riley K, Ebert D, Kraus M, et al. Efficient rendering of atmospheric phenomena[C]// Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering, Switzerland; Eurographics Association Press, 2004; 375-386
- [51] Bouthors A, Neyret F, Lefebvre S. Real-time realistic illumination and shading of stratiform clouds[C]// Proceedings of Eurographics Workshop on Natural Phenomena, Plano; Wordware Press, 2006
- [52] Bouthors A. Real-time realistic rendering of clouds[D]. Grenoble; Grenoble University, 2008
- [53] Stam J, Fiume E. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes[C]// Proceedings of ACM Siggraph '95, New York; ACM Press, 1995; 129-136
- [54] Max N, Schussman G, Miyazaki R, et al. Diffusion and multiple anisotropic scattering for global illumination in clouds[J]. Journal of WSCG, 2004, 12: 277-284
- [55] Dobashi Y, Yamamoto T, Nishita T. Interactive rendering method for displaying shafts of light[C]// Proceedings of the 8th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Washington, DC; IEEE Computer Society Press, 2000; 31-37
- [56] Dobashi Y, Yamamoto T, Nishita T. Interactive and realistic visualization system for earth-scale clouds[C]// Proceedings of the Pacific Graphics, Switzerland; Eurographics Association Press, 2009
- [57] Cabral B, Cam N, Foran J. Accelerated volume rendering and tomographic reconstruction using texture mapping hardware[C]// Proceedings of the Symposium on Volume Visualization, Washington, DC; IEEE Computer Society Press, 1994; 91-98
- [58] Behrens U, Ratering R. Adding shadows to a texture-based volume renderer[C]// Proceedings of the IEEE Symposium on Volume Visualization, Washington, DC; IEEE Computer Society Press, 1998; 39-46
- [59] Mueller K, Shareef N, Huang J, et al. High-quality splatting on rectilinear grids with efficient culling of occluded voxels[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1999, 5(2): 116-134