

火焰模拟方法的研究综述

王继州 顾耀林

(江南大学信息工程学院, 无锡 214122)

摘要 火焰等无规则物体的模拟近年来成为计算机动画领域中的一个研究热点,回顾了该领域中火焰模拟的各种模型的发展情况,总结了该研究方向所采用的各类方法,并结合各种模型的特点分门别类地详细展开。其方法总体上可以分为粒子系统方法、数学物理方法和纹理技术方法,讨论了各自方法的优缺点、适用范围和效果特征;展望了未来发展的3个重点:火焰细节、控制机制和模拟速度;并对这个方向的研究前景进行了必要的探讨。

关键词 火焰模拟 计算机动画 粒子系统 数学物理方法 Lattice-Boltzmann方法 纹理技术

中图分类号: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)11-1961-10

A Survey on Flame Simulation Methods

WANG Ji-zhou, GU Yao-lin

(School of Information Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214122)

Abstract This paper presented a survey on the development of flame simulation in computer animation, with a detail introduction to the classification of the works as well as different kinds of methods employed in the field. The methods applied mainly include the particle system method, the mathematic and physics-based method and the texture based method. Each method had their advantages and shortcomings, application scopes and result characteristics. We analyzed three important techniques briefly, including flames details, the control mechanisms and the simulation speed of results, and also discussed the tendency of this direction.

Keywords flame simulation, computer animation, particle system, physics-based method, Lattice-Boltzmann method, texture technique

1 引言

随着计算机图形学技术的飞速发展,火焰燃烧越来越多地出现在计算机动画、影视制作和媒体广告等场景之中。在对战场进行模拟的时候,火焰的模拟也是必不可少的。因此人们很早就开始研究用计算机进行火焰燃烧的模拟。

火焰同其他无规则的物体如:云、烟、雾一样,具有实时的多变性和无规则性。它们的外观形状极不规则、没有光滑的表面,这使得经典的欧几里得几何学对其描述就显得无能为力。同时,火焰在燃烧的过程中,要受到内外各种因素的作用和影响,再加上

火焰燃烧的形态非常丰富,不同的燃料在不同的情况下表现出巨大的差异,就更加向人们提出了严峻的考验。正因如此,在计算机上生成具有真实感的动态火焰效果,一直都是计算机图形学最具挑战性的工作之一。

近几十年来人们已经提出了很多火焰模拟的方法,其中的一些模型正在逐渐趋于成熟,应用的领域也不断地延伸。但由于种种原因,目前普遍认为比较满意的使用方法还比较有限,通用性都或多或少地受到了一定地限制,很难说哪一种方法更加适合人们的需要。因而对于计算机工作人员,特别是计算机图形学的研究者和制作者来说,不断探索和改进目前的模拟方法和理论、发展出新的更加便于人

收稿日期:2006-04-13; 改回日期:2006-08-15

第一作者简介:王继州(1975-),男。2007年于江南大学信息工程学院获计算机应用专业硕士学位。主要研究方向为计算机图形学、不规则物体的建模、计算机动画。E-mail:yylb99@163.com

们使用的模拟方法,把现有的各种方法的优点有机地结合起来,更好地满足时代发展的需要,仍然是摆在我们面前的重要课题,也是需要人们长期进行探索的重要方向。

在最近的研究当中,人们提出基于视觉效果模拟思路,就是根据计算机现有的软硬件水平,人们可以从模拟的视觉效果出发,来进一步提高计算机模拟的速度,尽量减少和优化计算过程的复杂度。目前,基于数学物理基础的计算流体动力学(CFD)已经成为计算机动画领域中的一个研究热点。如何进一步开拓CFD的应用范围,结合传统的火焰模拟方法生成比较准确的、实时的动画效果,依然是摆在人们面前的难题之一。

2000年张等人^[1]对计算机图形学领域的火焰、烟、云等不规则物体的早期建模及模拟方法的研究动态进行了综述性介绍,在描述云的分形几何模型、描述火焰的细胞自动机模型、描述气体现象运动特征的扩散过程及粒子系统模型、纹理映射模型和光照模型的基础上,分析和总结了几个主要方法的特点及使用场合。2005年柳等人^[2]回顾了该领域中基于物理的流体模拟的发展情况,总结了该研究方向所采用的各类方法,并结合各种现象的特点分门别类地详细展开,涉及的现象包括烟雾、火焰、爆炸、波浪、气泡以及自由运动界面等。

这里主要讨论了火焰的动态模拟问题,从当前计算机图形学真实模拟的研究和应用入手,给出了一个火焰模拟方法的研究综述。在相近的研究领域中我们也吸取了一些合理的成分;对未来的火焰模拟发展方法提出了一定的设想。

2 火焰模拟方法的分类

无论是从视觉效果上还是从实际的模拟情况来看,可以把计算机火焰模拟的方法大体分为3种类型:基于粒子系统的火焰模拟、基于数学物理模型的火焰模拟和基于纹理的火焰模拟。基于粒子系统的火焰模拟方法几乎已经成为最为成熟、最能经得起时间考验的重要模拟思想之一。基于数学物理模型的火焰模拟起源更早,早期的方法请参阅文献[1]。近些年,由于其模拟的精确性和计算机技术的发展,这种方法得到人们极大的重视,并逐渐成为人们考虑问题的出发点和进行模拟的重要目标。基于纹理技术的火焰模拟是人们从视觉角度出发所采用的简

化快速算法。下面分别探讨3种方法的研究与应用(主要是20世纪90年代中后期至今的研究动向与成果)。

2.1 粒子系统方法的火焰模拟

Reeves于1983年提出粒子系统作为模糊物体的建模方法^[3]。其基本思想是把无规则形状的物体看作是众多粒子所组成的粒子团,各个粒子都有自己的属性:如颜色、形状、大小、生存期、速度等。粒子随时间的推移而不断地改变状态,从而模拟出无规则的物体及其运动变化。从粒子系统方法诞生到现在,它已经逐步成为计算机图形学中应用最广、应用时间最长的方法之一。人们仍然在积极地对这种方法进行研究和扩展,不断地加以改进和完善,不断地拓展其应用的领域。

1999年谢等人^[4]运用粒子系统的一般原理,分析了雨点和雪花的静态和动态的属性特点,提出了基于粒子系统的雨点和雪花降落的实时模拟生成算法,并根据一定的原则对算法进行了一定的简化,从而实现了粒子系统在雨点和雪花模拟上的应用。Chen等人^[5]从计算流体动力学(CFD)的角度对灰尘的运动行为进行了3个阶段的细致分析,并且运用粒子系统的方法和图形学的其他相关技术加以实现,生成了较好的车轮灰尘效果。2000年Adabala等人^[6]在粒子系统方法中引入涡流元素方法(VEM)作为模拟的动力学基础,在气体体积里面估计粒子的密度,运用蒙特卡罗光线追踪来估计粒子的光辉,最后贴上粒子图,模拟气体的运动变化过程。2001年张等人^[7]采用粒子系统方法对不同精细程度的火焰进行了模拟,还研究了模型参数的变化对显示效果的影响以及表现风力的随机过程,对火焰粒子在各个坐标轴上的正态密度分布进行了新的探索。2003年Ilmonen等人^[8]延伸了传统的粒子方法,运用二阶粒子系统的动力产生器发射视觉效果粒子,较好地模拟了烟、云和爆炸等现象,并结合使用空间细分算法减少了计算的工作量。

赵等人^[9]于2004年运用粒子系统进行3维的火焰模拟,采用纹理映射和视线跟踪技术进行3维火焰渲染,同时,采用了层次化的编程结构,用以提供简单实用的交互性火焰模拟。

罗等人^[10]对基于粒子系统的基本原理进行了分析并提出了适用的雨粒子系统和雨粒子的属性,采用了把雨粒子产生区域定义为一个视图体顶部的外接长方体;用像素点和直线作为雨粒子的形状及

降落过程的重力作用模拟;用粒子组实现两粒子的连续补充和两粒子的降落高度检测等新的方法及算法。2004 年刘等人^[11]运用粒子系统模拟了导弹飞行航迹及烟雾。他们通过对粒子系统的具体控制和修改,利用 OpenGL 强大的纹理和融合功能,实现了特效的实时生成。这种方法能实现对特效的随意控制,对某些有特殊要求的效果能手工实现,有较大的灵活性,对粒子系统的多样性是一次进一步的补充。他们用带颗粒纹理的三角平面代替粒子,提高了模拟的速度。

2005 年费等人^[12]引入粒子系统作为可视化建模的基本方法,建立了包含火焰粒子模型、湍流流场子模型和燃料属性子模型的湍流燃烧火焰可视化模型。通过将温度场与湍流流场的有机结合及燃烧室内网格体单元的颜色与透明度的显示,实现了湍流燃烧火焰的 3 维动态传播可视化。Somasekaran 等人^[13]比较系统而全面地总结了粒子系统的数据结构、使用过程以及模拟的各种效果,从不同的视觉特征上比较了模拟的结果。可以说是粒子系统 20 年来的一次比较系统的总结。

粒子系统方法已经走过了 20 多个年头,取得了辉煌的业绩。它的应用领域已经得到了很大限度的扩充,已经成为计算机图形学中的一个重要手段和工具。然而我们看到,粒子系统本身并没发生太大的变化,只是其辅助手段得到了相应的增强,这是由其本身的一些局限性所决定的。这就要求我们在今后的研究工作中,进一步发挥粒子系统的优势,改进和克服它的不足,使其更好地发挥作用。

2.2 基于数学物理方法的火焰模拟

2.2.1 传统的数学物理模型

基于数学物理模型的方法,其中一个主要思想是把火焰看成是一种特殊的流体或特殊的物理过程,通过求解连续的 Navier-Stokes(NS)方程,从而实现对火焰发展变化的模拟。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

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

其中, \mathbf{u} 是速度场, p 是压力场, ν 是流体的动力学粘稠度, ρ 是密度, ∇ 是空间散度算符, \mathbf{f} 是外力。式(1)和式(2)分别代表的是流体运动时的质量与动量守恒定律。该方法能够精确地求解流体过程,对于流体运动变化的描述比较准确。它的计算比较复杂、计算量比较大,难以满足计算机图形学对模拟

效果的实时性的要求。但是由于其精确地反映了物体或现象的真实物理过程,能够带来准确的模拟效果,因而人们始终在尝试上述方程的计算机快速解法,以满足人们不断增长的需求。

Perry 等人^[14]在 1994 年进行了较早的尝试,他们用几何学与物理学来模拟火焰的合成效果以及火焰的传播过程,取得了初步的进展。1995 年 Stam 等人^[15]从热力学定律出发,提出了用扩散过程描述火和其他气体现象及其传播的方法。他们的基本思想是认为气体的物理特征需用随时间和空间变化的物理量来表示,这些量包括气体粒子的密度、扩散的速度、温度以及辐射性能,通常这些量之间的关系由著名 NS 方程表示。在计算的过程中人们进行了一些必要的简化得到了一定的燃烧和传播效果。

1998 年万等人^[16]基于流体力学和粒子系统给出了一个模拟实时喷泉水流的方法。与以往求解 NS 方程不同的是,他们通过求解该方程的一个特例和粒子动力学方程,就可以使用户在调整参数的同时观察到喷泉水流运动的变化。绘制的时候采用基于 Bezier Clipping 的光线跟踪方法,得到了较为真实的视觉效果。在文献[17]中唐等人以火的滚团现象作为研究对象,利用粒子系统结合旋涡场的方法,在 3 维范围内讨论了火团的形成及其所生成的气流,利用旋涡场的运动变化生成了实时的火团效果。Yoshida 等人^[18]于 2000 年通过漩涡矢量来表现烟雾的效果,同时对烟雾与障碍物的相互作用也进行了相应的模拟。

2000 年 Dobashi 等人^[19]依据细胞自动机的基本思路,对云雾的变化过程和渲染过程进行了深入的分析,生成了团状云的效果。随后 Fedkiw 等人^[20]在流体动力学领域运用半拉格朗日法进行求解,从而成功地模拟了烟雾的各种运动变化。2001 年 Beaudoin 等人^[21]从几何学矢量场中的矢量出发,在多角形网格上计算火焰粒子的传播动向,构造出一些火焰粒子的运动轨迹,然后根据少量的运动曲线,刻画出火焰的体积结构。Lee 等人^[22]提出在多边形的表面上模拟火焰动画的新方法。他们使用不连续极值的测地线的观念,直接计算火焰前锋在任意复杂物体表面上的运动。运用几何学的相关运算,该模型也支持火焰的多重前锋,还可以比较方便地进行火焰的合并等操作。

2002 年 Nguyen 等人^[23]通过直接求解 NS 方程进行火焰的模拟计算,他的一个辅助措施是引进了

燃烧核的概念。这是人们进行直接求解并进行模拟的一次非常重要的进展。目前为止,该方法所生成的火的燃烧效果是所有方法当中最好的一个。它所描绘的火焰场景也是迄今为止最为完美的效果。不过这种模型一个最大的不足在于其计算、模拟的速度太慢,这在一定程度上制约了它的应用范围。但是这种方法所开创的新思路却是非常值得我们推崇的。与此相同的方法还有 2003 年 Rasmussen 等人^[24]的研究成果,他们运用巧妙的加速策略,模拟了极大范围的燃烧、喷火、核武器的爆炸等效果,也生成了极佳的模拟效果。

2002 年 Melek 等人^[25]提出了交互性的火焰模拟方案,他们的主要理论依据是“稳流”中的气体动力学方程:

$$\frac{\partial g}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)g - \alpha_g g + S_g \quad (3)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)a - \alpha_a a \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)T - \alpha_T T + K_T \nabla^2 \quad (5)$$

其中,式(3)~(5)分别代表了燃料气体、燃烧废气和燃烧热量的传播, α_x 是向外的扩散率, S_g 代表源项, K_T 是扩散常量。

2003 年基于数学物理模型的火焰模拟的各种新方法层出不穷,其中比较具有代表性的主要有以下几篇文献:Lamorlette 等人^[26]所生成的真实场景中的火焰;Muzy 等人^[27]采用的基于胞元空间的火焰运动变化和传播的模拟;Roettger 等人^[28]运用的基于几何体计算法则的气体现象的绘制;Zhao 等人^[29]所绘制的桌面上燃烧的布,以及燃烧物体周围气流的分布情况;Duc 等人^[30]在文献中详细地总结了基于物理方法的模拟手段。他们模拟了许多自然现象,如火焰、烟雾、核爆炸、流水和物体的变形等,使计算机的模拟水平达到了一个全新的高度;Melek 等人^[31]运用传热过程模拟燃烧的对象;Barrero 等人^[32]从计算流体力学(CFD)出发对火焰、气体、涡旋等自然现象进行了模拟。

2004 年以后,火焰模拟的方法继续向前发展,出现了一些新动向;但是由于数学物理方法的计算过程过于复杂,这方面的努力似乎没有太大的突破。Ihrke 等人^[33]提出了基于视觉效果的拓扑重建技术来模拟火焰。Xin 等人^[34]2005 年依据真实的火焰燃烧学背景,以火焰的温度特征为主要控制对象,给

出非常逼真的火焰合成相片。Losasso 等人^[35]2006 年以现代格子为基础的技术模拟了固体物质燃烧或融化为液体、气体物质的全过程。

纵观十几年来火焰模拟的令人眼花缭乱的各式各样的方法,可以发现:基于数学物理的模型占据着重要的地位。这种方法不仅拥有相当数量的可选方案和坚实的理论基础,而且能够带来令人心悦诚服的模拟效果。尽管如此,在计算机综合能力还相对有限的现阶段,由于它的模拟手段目前还过于复杂,从而使其具有较大的局限性。

2.2.2 Lattice-Boltzmann 方法

数学物理方法的一条基本核心就是流体动力学方程,其连续性求解对于计算机动画来说简直是无法承受的,因此人们开始了不断的新的尝试。随着人们开始应用离散的方法来求解复杂的 NS 微分方程,逐渐出现了许多优秀的解决方案。Lattice-Boltzmann 方法(LBM)就是其中比较具有代表性的一种很好的方法。这种方法是从最早的细胞自动机逐步演化而来的一种比较优良的方法,目前已经为人们所广泛使用于流体模拟等领域。

Lattice-Boltzmann 方法从微观角度考虑问题,在满足 NS 方程的基础上对宏观流体、相变等物理现象进行科学地把握和控制。1998 年 Chen 等人^[36]对 LBM 在流体模拟中的应用进行了全面的分析和总结,详细论述了 LBM 的理论基础、推导过程和流体模拟中的边界条件问题。其精确严谨而有效的运算法则,为多相流和穿越复杂障碍问题的解决提供了强大的理论武器和行之有效的模拟方案。1999 年 Kandhai^[37]在论文里也对 Lattice-Boltzmann 方法的发展历程、理论基础、数学论证等都做了更加详细的介绍,并对该方法的模拟应用进行了进一步的扩充。

那么 Lattice-Boltzmann 方法能否用来模拟瞬息万变的火焰燃烧、烟雾的运动、蒸汽的流动等气体现象呢?2004 年 Wei 等人^[38]给出了肯定的回答。其核心运算方程如下:

$$\rho = \sum_i f_i \quad (6)$$

$$\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \sum_i f_i \mathbf{e}_i \quad (7)$$

$$f_i^{n+1} = \rho(A + B(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}) + C(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2 + D(u)^2) \quad (8)$$

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i, t + 1) - f_i(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau}(f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{n+1}(\rho, \mathbf{u})) \quad (9)$$

以上方程分别是宏观密度,速度方程,平衡分布方程和运动方程,其中 A, B, C, D 在特定的模型中代表不同的常数, x 为空间位置矢量, e_i 是单位矢量。

这种方法虽然说是传统的物理方法的进一步简化和改进,但这是人们首次采用 LBM 方法模拟火焰等气体现象的较为成功的一次尝试,试验取得了一定的模拟效果。2004 年 Wei 等人^[39]又运用 LBM 方法成功地模拟了流场的运动,实现了流场的可视化。同时她们还模拟了轻小的物体在空中随气流飘动的情景,并且运用并行算法对计算过程进行了加速。至此,LBM 的应用范围得到了进一步的扩大,被越来越多的人所关注。LBM 方法在其他自然现象方面的应用参见文献[40]。

2.3 基于纹理技术方法的火焰模拟

基于纹理的火焰模拟,是在整体和局部上采用纹理贴图的方法进行模拟。这种方法由于人们担心会留下人工制作的痕迹而较少使用,但是近些年来,纹理技术也逐步显现出其一定的优越性而逐渐为人们所认识、接受和运用。事实证明,任何一种方法只要我们对它的控制机理进行合理的调配,都应该可以达到一定的预期目的和效果。

2001 年 Harrise 等人^[41]在模拟云雾效果的时候,从人观察的视角出发,运用几何学,对要实现的场景进行了分解与合成。其中纹理图片的属性得到了合理地设置和控制,取得了很好的模拟效果。这种合成效果还可以模拟物体穿越天空云雾的情景,在纹理图片的叠加作用下,取得了比较真实的模拟效果。Schpok 等人^[42]于 2003 年运用图形硬件设备进行体渲染的方法,也得到了真实的具有变化特性的体积云的模拟效果。

2004 年左等人在文献[43]中,把纹理映射技术应用用于游戏引擎中最复杂、也是最能体现游戏效果的渲染模块,它能增强场景绘制的真实感并能提高场景的渲染速度。该文是对 3 维游戏引擎中的渲染模块的初步研究,首先介绍了 3 维游戏引擎系统以及纹理映射技术,使用 OpenGL 图形库实现了大环境天空盒、3 维地形的贴图效果,并加入了地面建筑物,再现了真实的 3 维场景。这个技术的应用使人们看到,纹理技术在场景整体效果上的重大而显著的作用。实现过程运用的是以下两种映射:

一是从纹理空间到参数空间的映射

$$\theta = f(u, v) \quad \varphi = g(u, v) \quad (10)$$

二是从参数空间到纹理空间的逆映射

$$u = r(\theta, \varphi) \quad v = s(\theta, \varphi) \quad (11)$$

其中, (u, v) 是纹理空间坐标系, (θ, φ) 是参数空间坐标系。

林等人^[44]在 2004 年运用粒子系统方法和纹理技术相结合,模拟了火焰燃烧的情景。首先用粒子系统的方法确定出一条变化的轮廓中心线,然后根据这条曲线向两边进行扩展,在大致确定了燃烧的范围之后,再进行一定规则的划分并填充纹理。这种方法简单、易于实现,但是模拟出的燃烧火焰是纯粹的 2 维结构,对于表现动态火焰燃烧的真实情节还有一定的局限性。

由最近几年的文献和研究可以看出:纹理技术在计算机模拟无规则物体方面还刚刚处于起步阶段,还没有达到其他方法那样成熟的地步。这当然跟它自身的特点有直接的关系,但是另一方面我们也能够清醒地看到,纹理方法也具有其他方法所无可替代的优势,只不过现在这种优势还没有被充分地发挥出来。在一些商用软件中,目前已经有比较成熟的技术应用于火焰等气体物体的模拟,例如 Maya 6 中火焰燃烧,采用的就是球形纹理的透明叠加效应。因此,纹理技术必将在越来越多的领域发挥越来越重要的作用。

2.4 不同方法的结合及其他模拟方法

除了上面讨论的方法,还有一些火焰模拟的模型是几种方法相互配合的共同结果。

1994 年陈等人^[45]就喷雾的模拟进行了初步的探索。他们在粒子系统的基础上结合纹理片的应用,对大量的喷射粒子进行了替换,选择大小不等的粒子片并设了较高的透明度,利用纹理片的显示叠加效应进行近似的模拟,取得了一定的效果。这是粒子系统与纹理技术结合的一个成功范例。1999 年童等人^[46]提出利用粒子系统和浓度场相结合的方法来模拟烟雾的运动与扩散。在粒子属性中加入一个浓度函数,通过粒子作用半径及浓度函数的变化模拟烟雾的扩散,还通过粒子的运动及分裂反映风力场的作用。这是粒子系统方法与数学物理方法相结合的模拟方法。

2002 年 Wei 等人^[47]用纹理贴片的方法进行火焰的模拟,它实际上是在 Lattice-Boltzmann 方法计算的基础上,对于火焰的表现细节加以必要的补充,即在不规则变化的燃烧边缘或边界处填充比较小的纹理片,从而在整体上丰富其最终的模拟效果。其 Lattice-Boltzmann 方法的计算过程却比较复杂,直接

制约了模拟速度的进一步提高;这也是数学物理方法与纹理技术相结合的重要尝试。

2002 年王等人^[48]将粒子系统和纹理映射相结合进行火焰的模拟。2003 年 Feldman 等人^[49]运用粒子系统与一定的物理模型配合使用,对爆炸性的火焰燃烧效果进行了模拟。他们从空气爆炸力学和热力学的基本原理出发,作了一些合理的简化,其热力学温度方程为

$$\dot{T} = -(u \cdot \nabla)T - c_c \left(\frac{T - T_c}{T_{\max} - T_c} \right)^4 + c_k \nabla^2 T + \frac{1}{\rho c_p} \dot{H} \quad (12)$$

其中, T 是温度, T_c 是环境的温度, T_{\max} 是环境中的最高温度, H 是进入流体的能量;而 c_c 代表冷却量, c_k 是热量的传导率。由于考虑到了火焰粒子间的交互碰撞和燃烧过程,模拟取得了比较形象、真实的爆炸燃烧效果。目前为止,这种方法是爆炸燃烧效果中做得最好的一个模型。2004 年 Adabala 等人^[50]对化学反应的剧烈燃烧进行了简化模拟。程序使用一个随机拉格朗日函数作为模型动力学的近似代替,对火焰的闪烁程度和火焰的高度进行了控制模拟。

多种方法的配合使用能够最大程度地发挥各种模型的优点,也给人们提供了现实可选的方案,因此将越来越受到人们的重视。尽管如此,人们仍在积极地寻求新的火焰燃烧模拟的解决办法。

Hasinoff 等人^[51]2003 年提出基于切片的火焰构造。该方法运用不同角度的视觉效果,从而合成一个具有立体效果的火焰模型。这种方法能构造出相对比较平和的火焰燃烧效果。尽管其通用性还有一定的限制,但这种尝试还是具有借鉴意义的。同年 Balci 等人^[52]提出采用类似机械工程中的弹簧块儿模型来模拟火焰的燃烧。火焰作为一个黑体辐射的源,并且应用种子图像进行纹理绘制,取得了很好的模拟结果。

3 各种方法的比较

粒子系统方法的火焰模拟,其思想方法比较简单,很容易在计算机上加以实现。它能表现一定的燃烧场景和燃烧细节,特别是火焰的随机变化表现比较容易,但由于其控制过程过于随机,无法实现对火焰真实燃烧的精确描述。在对火焰燃烧模拟要求不高的情况下,粒子系统方法具有很大的优势。另一个缺陷是:随着模拟场景中粒子数量的增加,对于这些粒子的控制和处理就会变得比较繁琐,系统开销急剧增加,系统运行的速度也会相应受到很大的制约,甚至有时会严重影响模拟的实时性。

基于数学物理的方法,其主要优点是:计算的依据比较科学合理;火焰运动变化的控制理论比较完备;计算结果基本符合真实燃烧的物理本性和其运动变化的特征,所以模拟的效果比较真实。在一些要求比较高的模拟场景中,这种方法往往被人们所采用,作为控制的重要基础。由于该方法的计算过程要对偏微分方程进行连续的或离散的求解,为了达到准确的收敛效果,往往需要进行迭代计算,因此计算的过程非常复杂,从而在一定程度上限制了该方法的应用领域。

基于纹理技术的方法虽然应用的范围有限、模拟的真实度受到一定的限制,但它也有比较明显的优势。一个简单的纹理图片就能够取代众多的模拟粒子,因而节省了大量的计算机资源,加快了计算机模拟的速度。纹理技术的核心是如何合理构建该方法应用的场合与方式、如何挑选具有代表性的纹理图片,以及如何管理和调配众多纹理图片的模拟属性。另外,纹理如何与场景紧密配合,使其更加符合人们的视觉效果等等,都是需要进一步解决的问题。总体来看,纹理技术的应用仍然具有比较广阔的发展前景。3 种方法的几项定性指标的比较情况如表 1 所示。

表 1 3 种主要模拟方法优缺点的定性比较

Tab. 1 The comparisons of three kind methods for flame simulation

模型	计算量	速度	表现形态	内存消耗
粒子系统方法	与粒子数量密切相关 粒子越多计算量越大	一般情况下比较快 粒子多的时候较慢	大致符合火焰的造型 但具有很大的随机性	粒子的数据结构和 数量影响内存需求
数学物理方法	计算的过程比较复杂 总计算量一般非常大	计算过程较缓慢,几十秒 到数分钟每帧	表现的火焰比较真实 灵活性有一定的限制	计算消耗较多内存 并行处理效果较好
纹理技术方法	计算过程相对较简单 取决于具体控制方式	计算量比较小,主要 取决于渲染速度	基本符合燃烧的场景 存在人工绘制的痕迹	与采用的纹理有关 大大少于粒子系统

4 研究动向

目前各种火焰模拟的方法都拥有其自身的特征和使用的范围,为了合理地促进各方法的进一步发展和拓展其应用领域,以及各种方法之间的相互配合,以下 3 个方面是在未来的研究过程当中需要重点加以关切的。

4.1 火焰的细节

火焰燃烧不同于一般意义上的流体运动,更不同于一般物体的表面变形。在燃烧的任意小的区域内,火焰的运动变化都是难以预料的,因此火焰的燃烧细节异常丰富多变。要想真实地再现和模拟这种特殊的气体现象,燃烧细节是不可或缺的表现手段。就 3 种方法而言,数学物理模型本质上是从小火焰的物理性质出发,从理论上对火焰的运动变化进行合理的计算,比较真实地再现了火焰燃烧的真实物理过程,所以,它最能体现火焰的真实变化,也能很好地表现出场景中的丰富细节。纹理技术如果运用得恰当合理,也能反映出火焰的一些重要特征如翻转、涡旋等效果。纹理技术也能在一些不便于直接进行计算的地方进行相应的补充,因此数学物理模型与纹理技术相互配合将会给人们呈现出更加美妙的模拟效果,例如文献[47]所生成的燃烧效果。

4.2 控制机制

火焰模拟的关键之一在于火焰运动变化的控制机制。好的控制方式能够准确描述火焰燃烧的具体变化情况,还能够合理调控计算的成本和代价。虽然粒子系统方法的初衷是用随机过程对模拟物体进行控制,但是,这种控制和管理计算机进行相关模拟操作的思想,对于数据结构的设计和整体调控,都为计算机工作者们提供了非常有使用价值的方法论基础。粒子系统方法为人们管理计算机图形学中的像素,以及各像素和像素集团之间的关系提供了有力的武器,并且这种过程非常简单易实现,缺点是不利于对物体及其变化的精确刻画。

数学物理模型从描述物体运动变化的微分方程出发进行计算,控制比较精确,因而从未来发展上看,数学物理模型具备比较明显的潜在趋势。粒子系统在关键的控制技术上如果采用数学物理模型,那么就会彻底摆脱其自身的随机性,实现对模拟对象的精确刻画。文献[23]是数学物理方法与粒子系统配合的杰作,并被公认为迄今为止火焰模拟的

最优秀典范。但是目前数学物理方法在计算上的障碍还需要进一步的研究并加以改进和克服。纹理技术的控制关键在于纹理图片的选择与调配、纹理贴图的大小与方位、纹理属性的设置与调节以及纹理方法的运用手段等。文献[44]是对纹理技术和粒子系统方法结合的尝试,但从中可以看出,模拟的效果并非理想。如何协调三者之间的控制关系,人们也许还在进行进一步的探索之中。

4.3 模拟速度

计算机图形学的发展经历了曲折漫长的历程,它本身每一步的前进与发展都与计算机本身的软、硬件的发展水平息息相关。对于计算机动画的研究者和制作者来说,人们一直在追求计算机模拟的实时性效果。然而由于种种原因,目前的很多算法、模型、方案等都离之还有一定的差距。如何进一步提升计算机模拟场景和物体的速度,提高模拟的效率,一直是人们不断追求的目标。粒子系统的模拟速度取决于所运用的粒子数目;数学物理模型的速度取决于计算模型的复杂度和计算效率;纹理技术所消耗时间相对较少,计算的复杂度相对较低。一般而言,粒子系统速度较快、纹理技术次之、数学物理方法速度最慢;在大的场景中,纹理技术比粒子系统的速度更快一些,因为此时粒子系统已经不堪重负。

除了以上的软件因素之外,计算机的硬件配置也会对计算的结果产生较大影响。人们目前正在积极地研究高速或合理简化求解数学物理模型的计算方法,目前也取得了一定的成果^[53,54]。

目前,在多种方法结合的模拟手段中,粒子系统与纹理技术结合的模拟速度最快,如文献[48]等;数学物理模型与纹理技术结合的模拟速度次之,如文献[45]等;数学物理模型与粒子系统结合的模拟速度最慢,如文献[24]等。

但是如何在个人计算机上实现算法的实质性的加速进展,或许还有很长的路要走。

4.4 火焰模拟的发展方向

很显然,任何一种单一的方法都已经无法满足人们越来越高的模拟需求,把现有模型的优势如何有机地结合在一起,业已成为人们着重思考的问题。一条切实可行的办法是:采用粒子系统的总体管理方式和流程思想在整体上进行把握,对于各个运动变化的参量控制机制,可以采用数学物理模型的控制模式进行比较精确的计算,显示模拟效果的时候,结合纹理技术进一步提高模拟的运行速度。当

然,仅仅满足于现有的方法还是不够的,也可以借鉴和吸收相关物体或现象(例如,柔软的物体、流体或其他自然物体和现象)的模拟方法,运用于火焰等无规则物体的模拟。随着各科科学的进一步深入发展,也会有更多的相应理论为人们所掌握,这需要多学科之间的紧密配合,也给我们的计算机图形学工作者们提出了更大的挑战。

5 结 论

火焰燃烧等无规则物体的动画模拟一直是计算机图形学中的一个难点和热点问题,本文详细讨论了近十几年来火焰模拟的各种模型和方法。每种方法都有其优势和使用的场合,但是每一种方法都不足以胜任所有类型、各种情况下的模拟需要。另外一个非常重要的原因是:火焰非常不同于一般意义上的物体或流体,其物理实质的复杂性、表现形态的丰富性、运动变化的随机性和计算模拟的艰巨性,都对我们提出了进一步的更高的要求,需要今后做进一步的深入探讨和研究。

尽管有人说:过去的十几年计算机图形学一直专注于制造燃烧、烟雾、流水等自然现象的真实效果,而现在这个行业开始转向设法创作面部表情、毛发和衣服运动的真实模拟^[2]。但是对于无规则物体和常见自然现象的模拟,人们并没有放慢脚步,也没有满足于目前所取得的成绩。设计、开发出一种实时的、真实的、高效的、交互性和通用性都很理想的火焰模拟方法和实用软件,一直是人们向往的重要目标,更是具有相当难度的工作之一。可以说,要用计算机来有效地模拟自然现象,还有很多问题值得我们深入细致地进行研究。

参考文献 (References)

- Zhang Qin, Xie Jun-yi, Wu Hui-zhong, et al. Overview of methods of modeling for irregular objects[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000, 5(3):186-190. [张芹, 谢隽毅, 吴惠中等. 火焰、烟、云等不规则物体的建模方法研究综述[J]. *中国图象图形学报*, 2000, 5(3):186-190.]
- Liu You-quan, Liu Xue-hui, Zhu Hong-bin, et al. Physically based fluid simulation in computer animation[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(12):2581-2589. [柳有权, 刘学慧, 朱红斌等. 基于物理的流体模拟动画综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(12):2581-2589.]
- Reeves William T. Particle systems—A technique for modeling a class of fuzzy objects[A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH '83*[C], Detroit, Michigan, USA, 1983:359-375.
- Xie Jian-bin, Hao Jian-xin, Cai Xuan-ping. The real time simulating algorithm of rain and snow descending based on particle systems[J]. *Journal of Image and Graphics*, 1999, 4(9):734-738. [谢剑斌, 郝建新, 蔡宣平. 基于粒子系统的雨点和雪花降落模拟生成[J]. *中国图象图形学报*, 1999, 4(9):734-738]
- Chen J X, Wegman E J, Fu X, et al. Near real-time simulation of particle systems[A]. In: *Proceedings of International Workshop on Distributed Interactive Simulation and Real-time Applications (DISRT'99)*[C], Greenbelt, Maryland, USA, 1999:33-40.
- Adabala N, Manohar S. Modeling and rendering of gaseous phenomena using particle maps[J]. *Journal of Visualization and Computer Animation*, 2000, (11):279-293.
- Zhang Qin, Wu Hui-zhong, Xie Jun-yi, et al. Study of particle system based flame modeling and realization[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2001, 13(1):78-82. [张芹, 吴惠中, 谢隽毅等. 基于粒子系统的火焰模型及其生成方法研究[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2001, 13(1):78-82.]
- Ilmonen T, Kontkanen J. The second order particle system[J]. *Journal of WSCG*, 2003, 11(1):1213-1218, 6972.
- Zhao Chun-xia, Zhang Yan, Zhan Shou-yi. 3-Dimensional fire simulation based on particle system[J]. *Journal of Computer Engineering and Application*, 2004, 40(28):73-75. [赵春霞, 张艳, 战守义. 基于粒子系统方法的三维火焰模拟[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(28):73-75.]
- Luo Wei-jia, Du Jin-kang, Xie Shun-ping. Real-time simulation of rain in 3D terrain scene based on particle systems[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(4):495-500. [罗维佳, 都金康, 谢顺平. 基于粒子系统的三维场地降雨实时模拟[J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(4):495-500.]
- Liu Yao-zhou, Zhang Xi-en. Special effect building for missile fly track and fog based on particle system[J]. *Computer Engineering*, 2004, 30(1):174-176. [刘耀周, 张锡恩. 基于粒子系统的导弹飞行轨迹及烟雾的特效生成[J]. *计算机工程*, 2004, 30(1):174-176.]
- Fei Shao-mei, Peng Yan-ying, Lu Guo-dong, et al. Visualization of turbulent combustion flame based on particle system[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(3):461-466. [费少梅, 彭艳莹, 陆国栋等. 基于粒子系统的湍流燃烧火焰的可视化研究[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(3):461-466.]
- Somasekaran S. Using Particle Systems to Simulate Real-time Fire [DB/OL]. <http://undergraduate.case.uwa.edu.au/year4/Current/Students/Files/2005/SanandananSomasekaran/CorrectedDissertation.pdf>, 2005-09-25.
- Perry H C, Picard W R. Synthesizing flames and their spreading[A]. In: *Proceedings of Eurographics Workshop on Animation and Simulation*[C], Oslo, Norway, 1994:56-66.
- Stam Jos, Fiume E. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes[A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH '95*[C],

- Los Angeles, California, USA, 1995:129 ~ 136.
- 16 Wan Hua-gen, Jin Xiao-gang, Peng Qun-sheng. Physically based real time fountain simulation [J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(9):774 ~ 779. [万华根, 金小刚, 彭群生. 基于物理模型的实时喷泉水流运动模拟[J]. 计算机学报, 1998, 21(9):774 ~ 779]
 - 17 Tang Hao-xuan, Hong Bin-rong. A new method for modeling the fireball [J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(8):857 ~ 863. [唐好选, 洪炳熔. 火团造型的一种新方法[J]. 计算机学报, 2000, 23(8):857 ~ 863]
 - 18 Yoshida S, Nishita T. Modelling of smoke flow taking obstacles into account [A]. In: Proceedings of Pacific Graphics [C], Hong Kong, China, 2000:135 ~ 145.
 - 19 Dobashi Y, Kaneda K, Yamashita H, et al. A simple, efficient method for realistic animation of clouds [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'00 [C], New Orleans, Louisiana, USA, 2000:19 ~ 28.
 - 20 Fedkiw R, Stam J, Jensen H W. Visual simulation of smoke [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'01 [C], Los Angeles, California, USA, 2001:15 ~ 22.
 - 21 Beaudoin P, Paquet S, Poulin P. Realistic and controllable fire simulation [A]. In: Proceeding of Graphics Interface [C], Ottawa, Ontario, Canada, 2001:159 ~ 166.
 - 22 Haeyoung Lee, Laehyoung Kim, Mark Meyer, et al. Meshes on fire [A]. In: Proceedings of Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation [C], Manchester, UK, 2001:75 ~ 84.
 - 23 Duc Quang Nguyen, Ronald Fedkiw, Henrik Wann Jensen. Physically based modeling and animation of fire [A]. ACM Transactions on Graphics [C], 2002, 21(3):721 ~ 728.
 - 24 Rasmussen N, Nguyen D, Geiger W, et al. Smoke simulation for large scale phenomena [A]. ACM Transactions on Graphics [C], 2003, 22(3):703 ~ 707.
 - 25 Melek Z, Keyser J. Interactive Simulation of Fire [R]. Austin, Texas, USA: Texas University, 2002:1 ~ 16.
 - 26 Lamarlette Arnauld, Foster Nick. Structural modeling of flames for a production environment [A]. ACM Transactions on Graphics [C], 2002, 21(3):729 ~ 735.
 - 27 Muzy A, Innocenty E, Santucci J F, et al. Optimization of cell spaces simulation for the modeling of fire spreading [A]. In: Proceedings of the IEEE Annual Simulation Symposium (ANS S'03) [C], Orlando, Florida, USA, 2003:289 ~ 296.
 - 28 Roettger S, Ertl T. Fast volumetric display of natural gaseous phenomena [A]. In: Proceedings of IEEE Computer Graphics International (CGI'03) [C], Tokyo, Japan, 2003:74 ~ 80.
 - 29 Zhao Y, Wei X, Fan Z, et al. Voxels on fire [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization Conference (VIS'03) [C], Seattle, Washington DC, USA, 2003:271 ~ 278.
 - 30 Duc N, Doug E, Ron F. Simulation and Animation of Fire and Other Natural Phenomena in the Visual Effects Industry [DB/OL]. <http://graphics.stanford.edu/~fedkiw/papers/stanford2003-11.pdf>, 2003-06-16.
 - 31 Melek Z, Keyser J. Interactive simulation of burning objects [A]. In: Proceedings of Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'03) [C], Canmore, Canada, 2003:462 ~ 466.
 - 32 Barrero D, Ozell B, Reggio M. On CFD and Graphic Animation for Fire Simulation [DB/OL]. <http://tetra.mech.ubc.ca/CFD03/papers/paper30AA5.pdf>, 2003-05-30.
 - 33 Ihrke I, Magnor M. Image-based tomographic reconstruction of flames [A]. In: Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation [C], Grenoble, France, 2004:365 ~ 373.
 - 34 Xin Y, Gore J P, McGrattan K B, et al. Fire dynamics simulation of a turbulent buoyant flame using a mixture-fraction-based combustion model [J]. Combustion and Flame, 2005, 141(4):329 ~ 335.
 - 35 Loessao F, Irving G, Guendelotian E, et al. Melting and burning solids into liquids and gases [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(3):343 ~ 352.
 - 36 Chen S, Doolean G D. Lattice Boltzmann method for fluid flows [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998, 30:329 ~ 364.
 - 37 Kandhai B D. Large-scale Lattice-Boltzmann simulations [D]. Amsterdam: University of Amsterdam, 1999.
 - 38 Wei X, Li W, Mueller K, et al. The Lattice-Boltzmann method for simulating gaseous phenomena [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, 10(2):164 ~ 176.
 - 39 Wei X, Zhao Y, Fan Z, et al. Lattice-Based flow field modeling [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, 10(6):719 ~ 729.
 - 40 Wei X. Lattice Based Natural Phenomena Modeling [D]. New York: University of Stony Brook, 2004.
 - 41 Harrise M J, Lastra A. Real-time cloud rendering [J]. Computer Graphics Forum, 2001, 20(3):76 ~ 84.
 - 42 Schpok J, Simons J, Ebert D, et al. A real-time cloud modeling, rendering, and animation system [A]. In: Proceedings of Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation [C], San Diego, California, USA, 2003:160 ~ 165.
 - 43 Zuo Lu-mei, Huang Xin-yuan. Texture mapping and its application in 3D game engine [J]. Journal of Computer Simulation, 2004, 21(10):146 ~ 148. [左鲁梅, 黄心渊. 纹理映射技术在三维游戏引擎中的应用[J]. 计算机仿真, 2004, 21(10):146 ~ 148]
 - 44 Lin Xi-wei, Yu Jin-hui. Computer synthesis of fire using particle and texture rendering [J]. Computer Applications, 2004, 24(4):77 ~ 79. [林夕伟, 于金辉. 基于粒子和纹理绘制的火焰合成[J]. 计算机应用, 2004, 24(4):77 ~ 79.]
 - 45 Chen Lin, Wang Yu-guo. Simulation of spray [J]. Journal of Software, 1994, 5(8):47 ~ 50. [陈林, 王裕国. 喷雾的模拟[J]. 软件学报, 1994, 5(8):47 ~ 50.]
 - 46 Tong Ruo-feng, Chen Ling-jun, Wang Guo-zhao. A method for quick smog simulation [J]. Journal of Software, 1999, 10(6):648 ~ 651. [童若峰, 陈凌钧, 汪国昭. 烟雾的快速模拟[J]. 软件学报, 1999, 10(6):648 ~ 651.]
 - 47 Wei X, Li W, Mueller K, et al. Simulating fire with texture splats [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization [C], Boston, Massachusetts, USA, 2002:227 ~ 234.
 - 48 Wang Zhi-gang, Chen He-ping, Liu Xin-xiong. The simulation of

- flame based on particle system and texture mapping[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2002, (4): 50 ~ 53. [王治刚, 陈和平, 刘心雄. 基于粒子系统和纹理映射的火焰模拟[J]. *工程图学学报*, 2002, (4): 50 ~ 53.]
- 49 Feldman B E, O'Brien J F, Arikian O. Animating suspended particle explosions[A]. *ACM Transactions on Graphics*[C], 2003, 22(3): 708 ~ 715.
- 50 Adabala N, Hughes C E. A parametric model for real-time flickering fire[A]. In: *Proceedings of Computer Animation and Social Agents (CASA'04)* [C], Geneva, Switzerland, 2004: 328 ~ 334.
- 51 Hasinoff S W, Kutulakos K N. Photoconsistent 3D fire by flame-sheet decomposition[A]. In: *Proceedings of IEEE International conference on Computer Vision* [C], Nice, France, 2003: 1184 ~ 1191.
- 52 Balci M, Foroosh H. Real-time 3D Fire Simulation Using a Spring-mass Model[DB/OL]. http://cil.cs.ucf.edu/pdf/balci_mmm06_realtime3dfiresimulation.pdf, 2006-01-19.
- 53 Harris M, Coombe G, Scheuermann T, et al. Physically-Based visual simulation on graphics hardware [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH/Eurographics Workshop Graphics Hardware* [C], Saarbrucken, Germany, 2002: 109 ~ 118.
- 54 Li W, Wei X, Kaufman A. Accelerating Lattice Boltzmann method on graphics hardware[R]. New York: University of Stony Brook, 2001.