

基于 GPU 编程的三维烟雾实时渲染

陈 阁, 何 伟, 李云飞

(苏州大学 计算机科学与技术学院, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 以实际项目为研究背景, 结合 GPU(Graphic Processing Unit)的特点, 采用 Stam 的半拉格朗日方法, 将 MacCormack 格式用于 NS(Navier-Stokes)方程的对流项求解, 利用光线投射法渲染烟雾, 在 GPU 上实现了 NS 方程的求解和烟雾的绘制, 比较真实地模拟了三维烟雾。

关键词: GPU; MacCormack 格式; NS 方程; 光线投射

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)06-0089-03

Real-Time Simulation and Rendering of 3D Smoke Based on GPU Programming

CHEN Ge, HE Wei, LI Yun-fei

(School of Computer Science & Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Natural scene simulation is always a hot issue in Computer Graphic, especially for the physically-based simulation of smoke. The subject is on the background of an actual project. This paper is based on the Stam's semi-Lagrangian scheme; MacCormack scheme is used to solve the advection item of NS (Navier-Stokes) equations, and ray casting method is chosen to render the smoke. We solve the NS equations and render smoke through the GPU (Graphic Processing Unit). This method can be taken for realistic animation and real-time simulation of smoke in three-dimensional space.

Key words: GPU; macCormack scheme; NS equation; ray casting

1 引言

烟雾模拟广泛应用于电脑游戏、影视特技、广告、科学计算可视化以及军事模拟和训练等领域,是计算机动画研究领域的一个热点问题。1984 年 Kajiyama 和 Herzen^[1]首次采用基于物理的方法对烟雾进行了模拟,但由于当时计算机性能的限制和模型没有采用足够的简化处理,这方面的研究除了在二维空间上取得了一些成果外,一直没有太大的发展和应用。1999 年,Stam^[2]引入半拉格朗日方法来求解对流项,同时结合隐式迭代的方法求解扩散项,这样求解格式稳定,使得整个模拟可以采用较大的时间步长,该方法为流体模拟的一个里程碑,此后,各种复杂流体的模拟很多都是基于该方法之上。2005

年,Andrew Selle 等^[3]则通过向流场加入粒子的旋涡约束来增加湍流效果,得到了浓烟滚滚的效果。2006 年,Bryan M. Klingner 等^[4]在模拟烟雾与刚体的耦合运动时采用了动态非结构网格,以捕捉刚体运动时周围烟雾的细节。而柳有权等^[5]则转而求助于硬件加速技术,他们利用 GPU(Graphic Processing Unit)来求解 NS 偏微分方程,使得烟雾模拟能够达到实时模拟和绘制。文中利用 GPU 并行计算的优势^[6],将 MacCormack^[7]格式用于 NS 偏微分方程的求解,并用体绘制中光线投射法渲染烟雾,NS 方程的求解和烟雾绘制均在 GPU 上完成,实现了视觉效果好、实时性高的三维烟雾模拟。

收稿日期: 2009-05-11; 修回日期: 2009-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(60775045); 江苏省科技厅项目(BK2005027)

2 物理模型

基于物理的流体(烟雾属于流体)模拟方法主要分为两种,一是从分析流体各个微团的运动着手,即研究流体中某一指定微团的速度、压强、密度等描述流体运动的参数随时间的变化,以及研究由一个流体微团转到其他流体微团时参数的变化,该方法称为拉格朗日法,是一种基于粒子的方法;二是从研究流体所占据的空间中各个固定点处的运动着手,分析运动流体所充满的空间中每一个固定点上的速度、压强、密度等参数随时间的变化,以及研究由某一空间点转到另一空间点时这些参数的变化,该方法称为欧拉法,是一种基于网格的方法.由于欧拉法易于在 GPU 上求解,因此文中采用基于欧拉的方法.

描述流体现象最为完整的是纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes Equation, NSE),该方程是根据牛顿第二定律推导出来的.计算机模拟中,通常用局部速度 u 表示流体的运动, u 是时间和位置的函数.文中采用不可压缩无粘性流体建立烟雾的物理模型,基于上述假设,速度被描述为动量方程:

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

不可压缩限制:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

式中, p 为压强, ρ 为烟雾密度, f 为外部施加的作用力, ∇ 为微分算子:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right]^T.$$

式(1)和式(2)分别代表了动量与质量的守恒定律.

为了使烟雾模拟达到更好的视觉效果,必须跟踪烟雾流动的附加量——密度和温度.

密度方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)\rho - \frac{1}{\rho} \nabla p + S_\rho \quad (3)$$

温度方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)T - \frac{1}{\rho} \nabla p + S_T \quad (4)$$

密度和温度的变化会反过来影响整个速度场.利用式(5)将浮力 f_{buoyancy} 施加到速度场上,使温度高的烟雾上升、温度低的烟雾下降.

$$f_{\text{buoyancy}} = \frac{Pmg}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) y \quad (5)$$

式中, m 为气体的摩尔质量, g 为重力加速度, R 为普适气体常数, T_0 为环境温度, T 为通过流动对流

的温度, y 为向上方向的单位向量.

式(1)~式(5),统称为 NS 方程组.

3 求解物理模型方程

在 GPU 上求解 NS 方程组,需要划分网格将求解区域离散,将速度、密度和温度三个变量整合成纹理的 4 个颜色通道,将整个运算整合到一个像素程序中,在每一个绘制帧,通过整个网格的像素程序更新属性值,从而大大减少了状态量的改变和整个绘制的遍数,优化了整个性能.由于整个计算域为三维的,而 GPU 是绘制二维纹理的,因此采用一系列二维切片的方式,对每一个切片进行一次绘制.

为了降低计算的复杂度,文中采用分步计算的策略,即通过状态量变换来合成,定义算子 S ,外力 F ,对流 A ,投影 P ,那么整个求解过程变为

$$S = P \cdot A \cdot F$$

因此,模拟运算法则的一个步骤可表示为 $S(u, t) = P \cdot A \cdot F(u, t)$.从右到左进行运算,先施加作用力,然后计算对流,最后计算压强,对速度场进行修正.

外力 F :外力主要包括局部力和质量力.假设在每一个时间步里外力是一个常量,就可以直接在每一个时间步的开始,将外力加入计算中.

对流 A :式(1)、式(3)、式(4)中等式右边第一项 $(\phi \cdot \nabla)\phi$ 为对流项,对流使得流体速度和其他量之间进行传输,对流项使得 NS 方程成为非线性.为了计算一个量的对流,Stam 使用半拉格朗日方法来求解,由于该方法是无条件稳定的,即可以使用较大的时间步长,所以该方法在流体模拟中广泛应用,然而,该方法会产生多余的数值平滑,模拟烟雾时会损失细节,为达到高阶精度,文中采用 MacCormack 格式求解对流项,此格式执行两次中间半拉格朗日对流步骤.给定一个对流量 ϕ 和对流格式 A ,通过下面一系列操作实现高阶精度:

$$\hat{\phi}_{n+1} = A(\phi^n)$$

$$\hat{\phi}^n = A^R(\hat{\phi}_{n+1})$$

$$\phi_{n+1} = \hat{\phi}_{n+1} + \frac{1}{2}(\phi^n - \hat{\phi}^n)$$

这里, ϕ^n 为对流的量, $\hat{\phi}_{n+1}$ 和 $\hat{\phi}^n$ 是中间量, ϕ_{n+1} 为最终对流结果. A^R 为反向对流(即时间回到上一步).

投影 P :根据 Helmholtz-Hodge^[8] 分解法则,计算域 D 上的一个向量场 w 可以被唯一地分解为如

下形式:

$$\cdot w = u + \nabla p \quad (6)$$

式中, u 的散度为 0, 并且与 ∂D 平行, 即: 在 ∂D 上 $u \cdot n = 0$. 通过减去压力的梯度来修正速度的散度 $w = u + \nabla p$.

至此, 一个时间步的计算已经完成整个模拟过程的求解, 从 $n = 0$ 开始, 循环往复地进行迭代计算, 直到 $n \geq \max \text{ time}$ 结束, 其流程如图 1 所示.

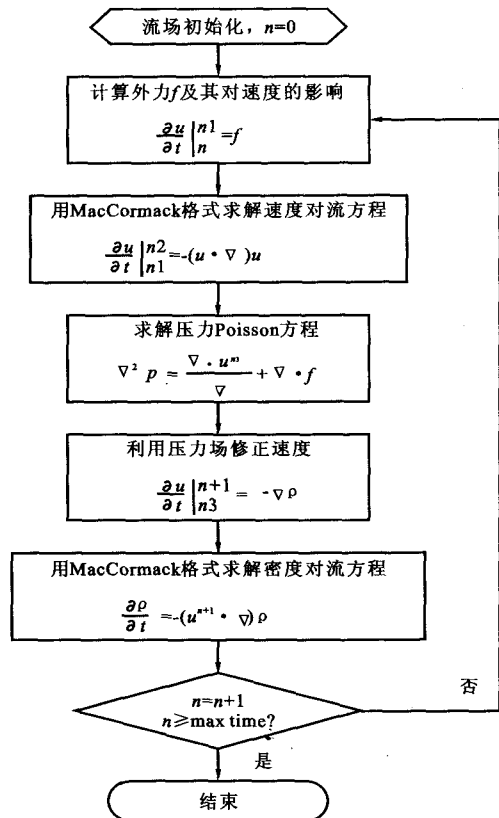


图 1 NS 方程的求解流程

4 烟雾的绘制

NS 方程组的求解结果作为体数据存储存储在 3D 纹理中, 要想直观地理解这些体数据, 必须将体数据可视化, 即采用一定的绘制方法将这些数据表示的烟雾现象直观地用图形显示出来. 体数据的绘制采用体绘制方法, 可以分为间接体绘制和直接体绘制两类. 间接体绘制是指从体数据中抽取等值面进行面绘制, 而直接体绘制则直接使用体数据按照直接体绘制光学模型进行合成. 直接体绘制中光线投射法更适合渲染烟雾并且容易在 GPU 上实现, 因此文中采用光线投射法.

光线投射法的基本原理是模拟光线穿越半透明物质时能量的累积变化, 即光线传播所遵守的传输

理论. 在光线投射法中, 从观察点发出的光线, 经过屏幕上的像素, 再穿越数据场, 该光线穿越数据场时进行色彩累积计算, 所得结果即为该像素的色彩, 光线投射基本原理如图 2 所示.

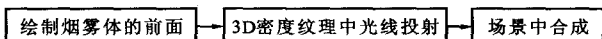


图 2 光线投射基本原理

文中采用两次光线跟踪的方法渲染烟雾. 第一次, 光线从光源出发穿越密度场, 考虑光线在密度场传播时的吸收、辐射、散射等因素, 并将光强信息保存在光线经过的各个体素中; 第二次, 光线从观察点出发, 经过屏幕上的像素, 再穿越数据场, 并将光线经过的各个体素中保存的光强信息进行累积计算, 从而得到此像素的色彩.

本课题是苏州某管理部门“虚拟太湖”项目中的一个子课题, 目标是模拟太湖上空烟雾弥漫的景象. 实验环境如表 1 所示, 操作系统采用 WindowsXP, 使用 Nvidia GeForce 6 显卡, 采用 CG(C for graphics)与 OpenGL 相结合的方式完成烟雾的绘制, 取得了比较理想的效果, 并且计算机模拟的速度也接近或达到了实时化的要求.

表 1 实验环境

软件环境	硬件环境
VC++ .Net(未使用 .Net 特性)	GeForce 6800GT
Microsoft Windows XP Professional	DDR 1G

在网格为 $128 \times 64 \times 64$, 绘制尺寸为 1280×1024 的情况下, 刷新频率达到了 40 帧以上, 满足了实时性的要求.

5 结束语

基于物理的烟雾模拟属于多学科交叉研究领域, 是计算机图形学与计算流体力学的结合. 文中针对一个特定的应用项目, 以 Stam 的半拉格朗日法为基础, 将 MacCormack 格式用于 NS 方程中对流项的求解, 用体绘制方法中光线投射法渲染烟雾, 在 GPU 上实现了 NS 方程的求解和烟雾的绘制, 实验表明本文的算法能够充分发挥 GPU 的性能, 能更好地满足三维烟雾实时绘制的应用需求. 文中的工作在飞行模拟、游戏、虚拟城市和军事演习等方面有较高的参考价值.

今后的工作包括: 考虑大规模的复杂场景, 采用区域分割方法, 对每个子区域单独进行网格划分和流场计算, 进一步完善仿真的效果.

(下转第 96 页)

$$R_R = A_R \times V \times T \quad (10)$$

式中, R_R 表示该风险的风险值, A_R 表示资产的价值, T 表示风险中漏洞所能利用威胁的数值, V 表示风险中脆弱性的数值, 也就是漏洞值。

根据定量的风险评估方法的计算, 得出每个风险的具体数值, 可以根据这个风险值对风险进行等级划分。参考国家标准, 定义严重程度 4 级, 如表 7 所示。

6 结束语

文中对信息安全和安全风险的发展背景和

表 7 风险严重程度及其描述

风险严重程度	风险值的范围	描述及相应对策
告知	[0, 25]	正常网络状态, 没有显著的网络攻击事件, 只存在零星攻击。此时保持普通安全策略。
预警	[25, 70]	有一些严重漏洞发布或网络攻击事件增多。需对网络和主机进行安全评估、升级以及必要的监控。
报警	[70, 100]	某些严重漏洞或威胁正被攻击者利用, 网络攻击事件显著增加。此时需要立刻采取防御措施。
紧急	[100, 125]	网络安全态势非常严峻, 对全球互联网造成严重影响。此时需要与其他网络协作采取防御措施。

风险理论相关的概念和方法作了详细介绍。通过对

信息安全风险评估的通用计算模型和定性风险计算模型进行了深入的学习和研究, 总结它们的缺点和不足, 在此基础上提出了一种定量的风险评估计算模型, 解决了以往定性风险评估计算模型的缺点, 提高了风险值的准确性和精度。

参考文献:

- [1] 冯登国, 张阳, 张玉清. 信息安全风险评估综述[J]. 通信学报, 2004, 25(7): 10-18.
- [2] 彭俊好, 徐国爱, 杨义先, 等. 基于效用的安全风险度量模型[J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(2): 59-61.
- [3] 汤永利, 徐国爱, 钮心忻, 等. 基于信息熵的信息安全风险的分析模[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(2): 50-53.
- [4] 于璐, 吴振强. 基于免疫的自适应安全模型[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(1): 113-117.
- [5] 高寅生. 安全漏洞库设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(3): 99-101.
- [6] ISO/IEC TR13335-1 Guide - lines for the management of IT security, part1: concepts and models for IT security [EB/OL]. [2004-11-19]. <http://www.din.de/ni/sc27>.
- [7] 孙强, 郭江鸿, 王慧. 基于消息通信的安全管理系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2006, 30(10): 134-139.

作者简介:

孙强 男, 博士, CCF 会员. 研究方向为信息安全和电子设计自动化等。

(上接第 91 页)

参考文献:

- [1] James T Kajiya, Brian P von Herzen. Ray tracing volume densities[J]. Computer Graphics, 1984, 18(3): 165-174.
- [2] Jos Stam. Stable fluids[C]//Proceedings of SIGGRAPH. Los Angeles: ACM Press, 1999: 121-128.
- [3] Andrew Selle, Nick Pasmussen, Ronald Fedkiw. A vortex particle method for Smoke, water and explosions[J]. ACM Siggraph, 2005, 24(3): 910-914.
- [4] Bryan M Klingner, Bryan E Feldman, Nuttapong Chentanez, et al. Fluid animation with dynamic meshes[C]//In ACM SIGGRAPH. Boston, ACM Press, 2006: 820-825.
- [5] 柳有权, 刘学慧, 吴恩华. 基于 GPU 带有复杂边界的

三维实时流体模拟[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 568-576.

- [6] 刘伟峰, 王智广. 细粒度并行计算编程模型研究[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(10): 103-106.
- [7] MacComack R W, Baldwin B s. A numerical method for solving the navier - stokes equations with application to shock boundary interactions[R]. AIAA-75-1, 1975.
- [8] Chorin A J, Marsden J E. A mathematical introduction to fluid mechanics[M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 1993.

作者简介:

陈阁 男(1981-), 硕士研究生. 研究方向为虚拟现实。
何伟 女, (1983-), 硕士研究生. 研究方向为虚拟现实。
李云飞 男, (1958-), 教授. 研究方向为虚拟仪器 & 虚拟现实。