

基于粒子系统的实时烟雾仿真*

王盛邦^{1,2} 纪庆革^{2,3,4}

- (1. 中山大学东校区教学实验中心, 广东 广州 510275;
2. 中山大学信息科学与技术学院, 广东 广州 510275;
3. 中山大学数字家庭教育部重点实验室, 广东 广州 510275;
4. 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要: 通过对烟雾力场的分析研究, 将局部力场和动态力场相结合, 用四边形面片代替粒子, 采用与纹理结合的方法, 让粒子以一定的角速度自转, 模拟了烟雾的漩涡、烟雾与障碍物碰撞等场景。实验表明, 该方法达到实时性要求, 帧率不低于 28。

关键词: 烟雾; 模拟; 粒子系统

中图分类号: O242.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 02-0009-05

烟雾的模拟方法可分为两大类: 基于网格的方法和基于粒子的方法。基于网格的方法, 把空间划分成很多个格子, 然后在这些格子上求解物理方程(例如 Navier-Stokes 方程或欧拉方程)。然而, 这些描述流动现象的方程求解相当耗时, 对时间步长极为敏感, 易导致结果发散^[1-3]。

Reeves^[4]提出了一种利用粒子系统模拟烟的浓度的方法。所谓粒子系统, 是采用图元的方法来描述物体, 将景物定义为由大量随机分布的粒子构成的集合, 通过简单图元表示景物的整体形态、特征和动态变化, 把运动的模糊物体看作由有限的具有确定属性的流动粒子所组成的集合, 粒子以连续或离散的方式充满它所处的空间, 并且不断地运动, 粒子在空间和时间上具有一定的分布。粒子系统是迄今为止被认为模拟不规则模糊物体最为成功的图形生成算法之一。虽然这种方法的计算精度不能满足工程上应用的需要, 但能捕获流体运动的基本特征, 满足很好的视觉效果。所以, 计算机图形学界逐渐开始广泛应用该方法来模拟流动现象^[5-9], 本文也是基于这种方法模拟烟雾。

粒子系统将无定形的和流动的形状(例如水、火和烟雾)表现为一组在仿真期间互不影响的点的集合, 即通过将每一微粒画成一个像素点或者作为一个小的布景板来描绘边界模糊的无定形物质。Reeves 曾用粒子系统的方法为电影“Star Trek II:

The Wrath of Khan”绘制了两个星球相撞时爆发大火而蔓延至整个星球的景象。Chen 等^[10]用粒子系统结合流体动力学模型和行为模拟技术模拟了车轮扬起的尘土。Unbescheiden 等^[11]从烟雾、水蒸气和云等云状物的物理原理出发, 用粒子系统建立了云状物的模型。刘耀周等^[12]用三角面片代替粒子, 采用与纹理结合的方法, 用粒子烟团模拟导弹飞行航迹及烟雾的生成与消散。鄢来斌等^[13]基于气体动力学和粒子系统理论, 以球为基本粒子对烟进行造型, 提出一种动态浓烟建模与实时生成动态浓烟的方法。

1 烟雾的力场

烟雾是少量的炭分子悬浮在一个大体积的热空气中, 这些烟雾微粒的质量或体积很小, 因此烟雾仿真实际上是周围介质(空气)的流动仿真, 也就是寻求一种方法, 将烟雾绘制出来, 使气流变得可见, 外在的控制产生近似于周围空气影响的力。

为了模拟流动现象, 计算流体力学领域(CFD)的众多研究者已经做了大量的工作。但在计算机图形学领域, 目前主要是针对不可压的无粘低速流动现象模拟, 以满足电影特效或者游戏特效的需要, 例如烟、火、云彩和流水等^[14]。本文只针对不可压的无粘低速流动现象。为简化起见, 我们考虑作用在微粒上的力: 漩涡、风、浮力、重

* 收稿日期: 2007-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60473109); 广东省博士启动基金资助项目(04300602); 珠海市科技计划资助项目(PC20061005); 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放基金资助项目(U0735001)

作者简介: 王盛邦(1962年生), 男, 工程师; 通讯联系人: 纪庆革; E-mail: issjqg@mail.sysu.edu.cn

力。

漩涡是特殊的粒子运动,它在附近的小范围内施加一个涡流力(图1)。其他的则是全局的力。

粒子与场景的交互作用完全是非渗透性约束。粒子经历无弹性刚体与物体相碰撞,但是物体没有由于碰撞而受压迫(当假定微粒的质量为零时),粒子相互之间并不碰撞。

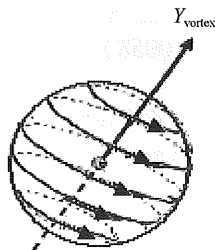


图1 漩涡场
Figure1 Vortex field

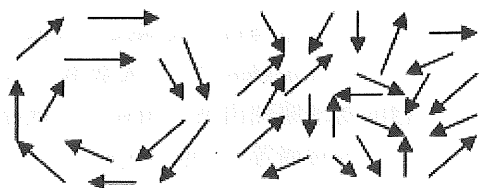


图2 复杂的风场
Figure2 Complex wind fields

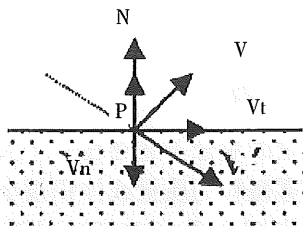


图3 烟粒子与障碍物碰撞分析
Figure3 Smoke particle and obstacle collision analysis

• 漩涡

漩涡是浓烟中最有趣的一个现象,文献[3]用网格的方法逼真模拟了这种现象。在图1中,我们将漩涡场定义为实数域上的5维向量 Y_{vortex} ,即:

$$Y_{\text{vortex}} = \{W, \Delta W, P, V, A\}$$

其中, W 是处于漩涡场内的烟粒子的旋转角度, ΔW 是角度增量, $P = \{x, y, z\}^T$ 是漩涡场的空间位置, $V = \{V_x, V_y, V_z\}^T$ 是漩涡场的速度, A 是漩涡场的加速度。漩涡场由粒子系统生成,并且在生成时它的各个属性值被初始化。漩涡场生成后,随着时间的推移,其属性开始变化,假设第 $j+1$ 帧与第 j 帧的时间间隔为 Δt ,则第 $j+1$ 帧时漩

涡场的旋转角度属性值为:

$$W_{j+1} = W_j + \Delta W \times \Delta t \quad (1)$$

漩涡场的位置和速度为:

$$P_{j+1} = P_j + V_j \times \Delta t \quad (2)$$

$$V_{j+1} = V_j + A \times \Delta t \quad (3)$$

因为一个漩涡只能影响附近的粒子,模拟时需要有效地定位它们。

• 风力

风力是一个随时间变化、空间一致的力场。风可以是阵风,图2展示的是复杂的风场。通常,模拟时风速 V 以一个随机数和一个方向 α 给出,像公式(4):

$$V = V_w \times \cos \alpha + R \quad (4)$$

其中 V_w 是一个给定的风速, R 是一个随机数。

• 浮力和重力

对于同种材料的所有粒子而言,施加在其上的浮力是一个不变的力。粒子依靠它们的密度以不同的比率加速。重力是施加在所有粒子上不变的向下加速度。

由于烟的温度高、密度小,烟受到周围冷空气影响产生浮力,其浮力大小为:

$$F_{bv} = -\beta g_v (T_0 - T_k) \quad (5)$$

其中, g_v 是垂直方向上的重力, T_0 是气体最初的温度, T_k 是烟粒子周围气体的平均温度, β 是热气流扩张系数。

• 局部力场与动态力场

像浮力、重力,就属于全局力场(作用于整个区域);风力可设为全局力场,也可视情况设置为局部力场(使局部形态产生变化)。例如,风从一个小的窗口吹入;漩涡是典型的局部力场。局部力场可多处设置,激活这些局部力场,就可以生成生动的动态效果。

受“网格”方法的启发,我们采用“粗网格”来分析烟雾的运动。在图4所示区域上:在

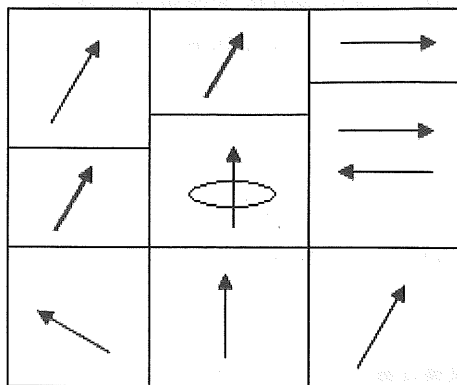


图4 烟雾的复杂力场
Figure4 Smog in the complex field

烟雾的下部与边缘通常是变化较少的部分;而在烟雾的上部,为了表现烟雾较大的不规则的变化及扩散,我们采用较小的网格表示;在网格中部(即内部)是表现较为复杂的的部分,这一部分可以用局部力场,设计如漩涡等特定的力场来表现烟的某种特定形态。

更进一步,我们引入动态运动场(即有一定的随机性的力场)的思想。通过控制运动场的运动可以动态地改变烟粒子的运动规律,使烟粒子的运动更具真实感,产生“浓烟滚滚”的效果。由于所有粒子从下部较为简单的环境中经过时,运动形式都差不多,因而这部分的处理相对简单;但当它们上升到一定高度后,受局部力场的控制,由于每个力场给它们的力大小方向都不同,就会出现烟雾翻滚或漩涡这样的复杂运动。

2 烟对障碍物的碰撞处理与烟的扩散

Navier - Stokes 方程所描述的气体现象,是在一个封闭空间或没有障碍物的环境。但事实上,现实世界的烟雾,例如火灾烟雾,往往会与静态(或动态)的障碍物发生碰撞,粒子系统处理这种情况比较困难^[15]。假设粒子以一定的速度 V 运动,遇到某平面或球面时(法矢为 N)将产生反弹,设 Q 是平面上一点, N 是指向平面的法向量,则可根据 $(X - Q) \cdot N$ 的符号来判断粒子 X 是否与平面发生碰撞,若其值大于 0, X 已进入平面,等于 0, X 刚好与平面接触,小于 0, 未发生接触和碰撞。一旦检测到碰撞的发生,应对粒子的位置进行处理,如果不考虑能量的损失,反弹后的粒子速度为:

$$V' = V - 2(V \cdot N)N$$

如果考虑摩擦和粒子弹性,粒子反弹后的速度可分解为法向速度 V_n 和切向速度 V_t 两部分,如图 3 所示。且有:

$$V_n = (V \cdot N)N, V_t = V - V_n \quad (6)$$

烟产生后很快在空间中扩散。假定密度是个常量,即气体不可压缩,在给定风向条件下,扩散方程为:

$$\frac{dT}{dt} = K_t \nabla^2 T + T_s - T_L \quad (7)$$

其中 T 为温度, K_t 为扩散系数, T_s 为源点温度, T_L 为汇点温度, t 为时间。

3 粒子运动的力学原理与粒子系统的一般模拟过程

粒子有它的运动学和动力学原理。运动学考虑

粒子的位置、速度、加速度;动力学考虑力的作用。粒子产生的时候都具有一定的初始属性,粒子作为质点,按照动力学的规律进行运动。粒子的位置和速度变化遵循下面的原则:

$$V = V_0 + \int_0^t A \, ds \quad (8)$$

$$P = P_0 + \int_0^t V \, ds \quad (9)$$

其中 P 为粒子位置, P_0 为粒子初始位置, V 为粒子速度, V_0 为初始速度, A 为粒子加速度。

为了消除积分运算,(8),(9)这两个方程的粒子的状态变化可用 Euler 方法计算:

$$V(t + \Delta t) = V(t) + A(t) \times \Delta t \quad (10)$$

$$P(t + \Delta t) = P(t) + V(t) \times \Delta t \quad (11)$$

按照粒子系统绘制画面的一般步骤及本文的方法,生成烟每帧图像的基本步骤为:

- (1) 粒子系统生成新的烟粒子和运动场;
 - (2) 赋予每一个新的烟粒子和新的运动场一定的初始属性;
 - (3) 删除系统中超过生存期的烟粒子和死亡的运动场;
 - (4) 根据设定的规律更新运动场的位置和速度等属性;
 - (5) 根据设定的规律更新烟粒子的颜色、大小和透明度等属性;根据烟粒子受力情况更新烟粒子的位置和速度属性;
 - (6) 检测是否和外界发生碰撞,如果发生碰撞,则消除碰撞;
 - (7) 绘制并显示由有生命的粒子组成的图像。
- 其中步骤(3)-(7)不停地循环,就形成了物体的动态变化过程。

4 烟雾绘制

确定了粒子系统的产生、运动和消亡等状态,下面进行烟雾的绘制工作。烟的密度分布模型需要较少数据,我们考虑烟粒子的一个集合,把烟当作烟群处理,烟群被称为“一阵喷烟”(puff)。当燃点产生后,烟流会向上喷发,烟幕上半部分烟量较大,下半部分烟量较小。我们使用面片定义喷烟的密度分布。根据速度场、力场移动来模拟烟的运动。

烟雾的绘制是一个重要的环节。一般的基于粒子的烟雾模拟,可采用 OpenGL 来实现,并采用纹理贴图提高绘制的真实感。

由于烟雾的内部结构非常复杂,逼真地模拟烟雾是一件十分困难的事。在我们的工作中,将局部

力场和动态力场相结合,来模拟像漩涡这样的现象,让烟雾从局部到整体都尽可能生动。

在表现烟粒子方面,我们选用四边形面片来表示烟粒子,采用图5作为面片的纹理贴图。采用四边形面片,便于确定面片的重心。在绘制时,从粒子中心(即就是四边形对角线的交点)算出四边形第一个顶点的坐标,然后再确定其他坐标。由于四边形的中心已确定,可以容易地使粒子绕中心按一定的随机角度自转(图6)。自转时让各粒子以不同角度呈现,就可以打破粒子运动的规律性。否则全部单一地平铺,粒子就像纸片相互重叠地平铺在屏幕上,既没有层次感,又不能呈现三维效果。由于烟粒子自转的随机性,烟雾的局部都不完全相同。同时在粒子被发射时,我们添加随机效果,这样可以避免粒子好像都在同一时间产生。另外,设定一个粒子大小的变化速率和透明度变化速率、颜色变化速率,粒子在上升过程中,中部至顶部在飘逸中不断扩散、淡化,直至消失。

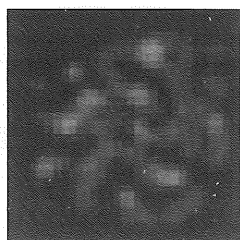


图5 烟粒子纹理图
Fig.5 Smoke particle texture chart

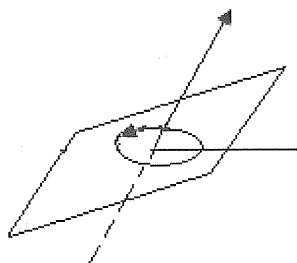


图6 粒子自转
Fig.6 Particle rotation

绘制过程中我们主要采用了下面一些处理方法:

- (1) 调整视角,使视角斜向上看。这符合我们观察烟雾时的姿势;
- (2) 用四边形面片代替粒子,如上面贴图4的纹理。实验结果表明,图4的纹理能产生较理想的烟的外观;
- (3) 使用深度缓存。在深度缓存下画四边形、贴纹理,然后使用透明、混合效果,能明显提高烟粒子的显示效果;
- (4) 控制粒子大小。由于产生烟时一般是下面小上面大,因而在粒子上升过程中,适当控制粒子大小,可增强视觉效果;
- (5) 使用线性纹理滤波,加强纹理映射效果。

5 实验结果与讨论

下图7是实验截图,表1是实验数据。

表1数据来自PC的硬件环境是Intel Pentium 2.8 GHz,主内存512 M,独立显卡,显存128 M,

操作系统为Windows XP Professional,整个实验基于OpenGL。

与本文相比较,文献[13]中模拟的烟雾,由于只是采用简单的方法来确定粒子的位置,只能产生简单形态的烟雾。

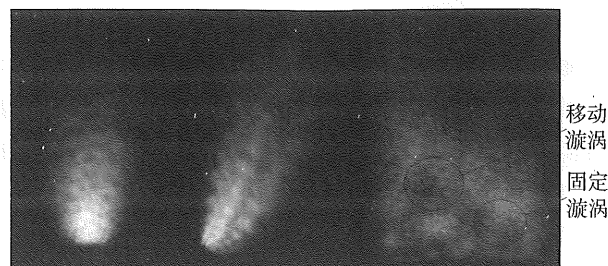


图7 烟雾实验
Fig.7 Experimental smoke

表1 场景复杂度以及对应的动画帧率
Tab.1 Scene complexity and animation frame rate

场景	图7左	图7中	图7右	图8
粒子数(个)	177	192	800	560
帧率(FPS)	62	43	46	28

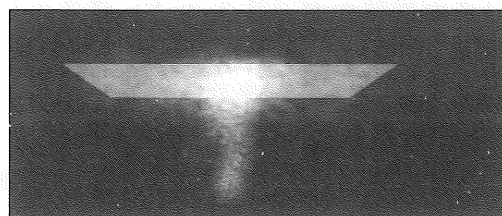


图8 烟遇天花板时扩散的情景
Fig.8 The diffuse smoke under the ceiling

在表现烟雾粒子方面,以球为基本粒子对烟进行造型,但局部上看烟都一样^[13];文献[11]以三角形面片表示烟粒子,不过渲染手法单一,虽能产生与大量粒子模拟时同样的效果,与烟的复杂多变的形态相比较仍有一些距离。

从模拟的结果可以看出,通过模拟得到的图像在形状和行为上跟真实的烟雾都较为相似,表1中的各项参数表明,利用漩涡场结合粒子模型生成烟雾的模拟方法完全达到了实时的效果。另外,由于编程时对粒子和漩涡场的位置表示均在三维坐标系内,它们的运动也表现为三维的运动,所以模拟的结果更自然、逼真,更符合实际情况。

本文首先对国内外烟雾模拟的研究现状进行了总结。本文在粒子系统的基础上,通过对烟雾力场的分析,结合纹理映射技术,提出了基于粒子系统

的实时烟雾模拟方法, 该方法兼顾烟雾的真实感和系统运行的实时性, 主要考虑视觉上的效果, 包括消散、漩涡和障碍物碰撞。下一步的工作可以考虑将本文应用于游戏、电影等虚拟场景中。

参考文献:

- [1] FOSTER N, METAZAS D. Modeling the motion of a hot [C]//Turbulent Gas Proc of SIGGRAPH 97, 1997: 181 - 188.
- [2] STAM, EUGENE F. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes[J]. Computer Graphics, 1994, 29(4): 129 - 135.
- [3] FEDKIW R, STAM J, REEVES W T, et al. Visual simulation of smoke[C]//SIGGRAPH 2001 Conference Proceedings, 2001: 15 - 22.
- [4] REEVES W T. Particle Systems - A technique for modeling a class of fuzzy objects[C]//ACM Computer Graphics (SIGGRAPH83), 1983, 17(3): 359 - 376.
- [5] ENRIGHT D, MARSCHNER S, FEDKIW R. Animation and rendering of complex water surfaces[C]//ACM Trans on Graphics (Proc of the SIGGRAPH), 2002, 21(3): 736 - 744.
- [6] FEDKIW R, STAM J, JENSEN H W. Visual simulation of smoke[C]//Proc of the SIGGRAPH, New York: ACM Press, 2001: 15 - 22.
- [7] FOSTER N, FEDKIW R. Practical animation of liquids [C]//Proc of the SIGGRAPH New York: ACM Press, 2001: 23 - 30.
- [8] RASMUSSEN N, NGUYEN D Q, GEIGER W, FEDKIW R. Smoke simulation for large scale phenomena[C]//ACM Trans on Graphics (Proc of the SIGGRAPH), 2003, 22(3): 703 - 707.
- [9] NGUYEN D Q, FEDKIW R, JENSEN H W. Physically based modeling and animation of fire[C]//ACM Trans. on Graphics (Proc. of the SIGGRAPH), 2002, 21(3): 721 - 728.
- [10] CHEN J Z, WEGMAN E J, FU X D, et al. Near real-time simulation of particle systems[C]//Distributed Interactive Simulation and Real-Time Applications, Proceedings. 3rd IEEE International Workshop on. Glasgow: IEEE Computer Society Press, 1990: 33 - 40.
- [11] UNBESCHIEDEN M, TREMBILSKI A. Cloud Simulation in Virtual Environments[C]//Virtual Reality Annual International Symposium, Proceedings IEEE 1998, California: IEEE Computer Society Press, 1998: 98 - 104.
- [12] 刘耀周, 张锡恩. 基于粒子系统的导弹飞行航迹及烟雾的特效生成[J]. 计算机工程, 2004, 30(1): 174 - 176.
- LIU Y Z, ZHANG X. Special effect building for missile fly track and fog based on particle system[J]. Computer Engineering, 2004, 30(1): 174 - 176.
- [13] 鄢来斌, 李思昆, 曾亮, 何连跃. 动态浓烟建模与实时绘制技术研究[J]. 计算机工程与科学, 2001, 23(11): 68 - 74.
- YAN L B, LI S K, ZENG L, HE L Y. Research of Real-Time Rendering and Modeling of Dynamic Dense Smoke[J]. Computer Engineering & Science, 2001, 23(1): 68 - 74.
- [14] 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]. Journal of Software, 2006, 17(3): 568 - 576.
- LIU Y Q, LIU X H, WU E H. Real-Time 3D Fluid Simulation on GPU with Complex Obstacles[J]. Journal of Software, 2006, 17(3): 568 - 576.
- [15] FOSTER N, METAZAS D. Modeling the Motion of a Hot[C]//Turbulent Gas SIGGRAPH97, 1997: 1881 - 1887.

Real-time Smoke Simulation Based on the Particle System

WANG Sheng-bang^{1,2} JI Qing-ge^{2,3,4}

- (1. Teaching Experimental Center, Eastern Campus, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Key Laboratory of Digital Life, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
4. State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Through the analysis of the smoke field and combining the local field with the dynamic field, some sciences are simulated, such as whirlpools of the smog, collisions between smog and obstacles, by replacing particles with quadrilateral surfaces, adopting a way combining with textures and making particles rotate in a certain angular velocity. The experiments show that this method meets the real-time requirements, with the frame rate not less than 28.

Key words: smoke; simulation; particle system