

火焰、烟、云等不规则物体的建模方法研究综述

张芹 谢隽毅 吴慧中 张正军

(南京理工大学计算机系, 南京 210094)

摘要 对计算机图形学领域的火焰、烟、云等不规则物体建模及模拟方法的研究动态进行了综述性介绍, 在介绍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。

关键词 不规则物体建模 扩散过程 粒子系统 细胞自动机 分形

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)03-0186-05

Overview of Methods of Modeling for Irregular Objects

ZHANG Qin, XIE Jun-yi, WU Hui-zhong, ZHANG Zhen-jun

(Computer Department Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract Developing a visually convincing model of fire, smoke, clouds and other irregular fuzzy objects is the most difficult and attractive problems in computer graphics. This paper relates several methods for modeling and simulating irregular objects such as fire, smoke, and clouds. Solid texture-based model, fractal-based clouds model, diffusion processes-based fire model, cellular automata-based flame model, and particle system-based fire model and clouds model presented by researchers in recent years are introduced here. Lastly, we analyze the performance such as representation of the object, a model for its spatiotemporal behavior and application environments of these existing models, especially for the models based on particle system which can represent motion, changes of form, and dynamics that are not possible with classical surfaced-based representations and can easily generate richly detailed images. For particle system, the quickly computable models have to be developed to describe these objects in the future.

Keywords Modeling for irregular objects, Diffusion processes, Particle system, Cellular automata, Fractal

0 引言

用计算机生成真实感图形一直是计算机图形学中最具有挑战性的研究方向之一, 特别是对不规则物体的模拟十分困难, 原因在于:

(1) 火、烟和云等均系气体现象, 其形成都是由无数小颗粒随机运动而产生, 外观形状极不规则, 没有光滑的表面, 而且极其复杂与随意, 并可能随时间而发生变化, 这使得用经典的欧几里德几何学对其描述显得无能为力, 如用直线、圆弧、和样条曲线等去建模, 则其逼真度就非常差;

(2) 几乎每一个人都知道这类现象, 如火焰、烟及云是什么样子, 但却很少有人能够准确地将其形状描述出来;

(3) 火焰等气体现象的运动十分复杂, 如火焰忽隐忽现, 烟袅袅上升, 云则虚无缥缈, 同时, 在火焰燃烧、烟雾扩散以及云层飘动过程中, 还会受到风力的作用, 使其发生捉摸不定的变化。

尽管如此, 国内外学者一直在努力探索, 先后提出了表示火、烟、云等不规则模糊物体的粒子系统模型、细胞自动机模型、分形模型、扩散过程模型、光照模型及纹理映射模型等。

1 主要方法

1.1 基于粒子系统的模型

1.1.1 基于粒子系统的火焰模型

1983 年由 W. T. Reeves 等首次系统地提出了一种用于不规则模糊物体(如火、云、水等)建模的方法^[1]. 当时 Reeves 为电影 Star Trek II 绘制星系爆炸的场面. “粒子系统”就是由大量粒子集合在一起表现模糊物体的计算机模拟系统, 其基本思想是把模糊物体看作是众多粒子组成的粒子团, 各粒子均有自己的属性, 如颜色、形状、大小、生存期、速度等. 该系统在不同时刻的状态由粒子的动力学性质决定, 粒子随时间的推移而不断地运动, 并不断改变状态. 这种粒子运动(包括平移、旋转、自转、涡旋、反弹、比例变换等), 均可以通过受控的随机过程来模拟实现. 该系统始终处于动态的变化中, 即新粒子通过可控的随机过程不断地产生, 旧粒子不断地消亡. 在某一给定帧图象中产生粒子的数量可用方程来确定, 该方程包括一帧上生成粒子的平均数量和方差, 或是屏幕上每单位区域上产生粒子的数量和方差.

在火焰的粒子运动中, 相互靠近的粒子保持靠近或以平稳的线形方式分开, 其中的粒子在一段时间内整齐地上升, 产生具有叠加速度和叠加幅度的神秘的蜿蜒和盘旋运动. 因此, 火焰的粒子运动实现过程如图 1 所示.

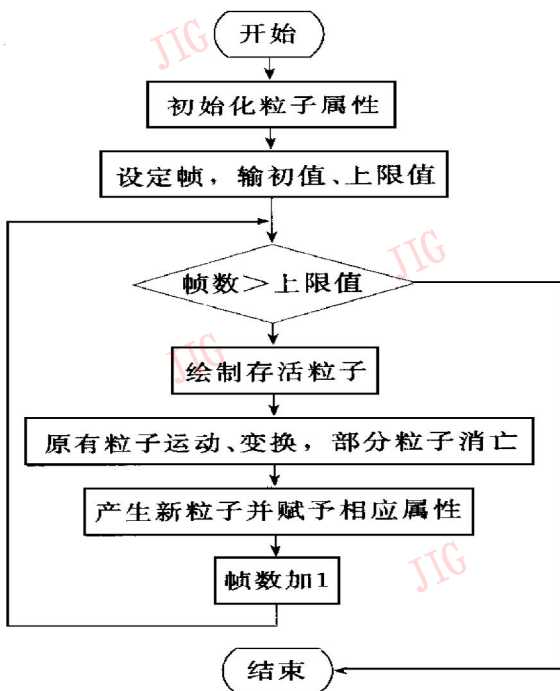


图1 火焰粒子系统流程

1.1.2 基于粒子系统的云的模型

1998 年 Matthias Unbescheiden 和 Andrzej Trembilski 运用粒子系统, 从云的物理原理出发, 结合纹理映射技术建立了云的模型^[2], 其核心是采用具有纹理的多面体顶点集代替粒子群, 以大大减少粒子系统中粒子的数量, 从而使粒子系统的实时仿真能得以实现.

Matthias 等由浮力原理、理想气体定律及冷却定律导出描述气体流动的公式为:

$$F_{up}(t) = \frac{gpV}{R} \left| \frac{\mu_A}{T_A} - \frac{\mu_C}{(T_C(0) - T_A) \exp(-t/\tau) + T_A} \right|$$

其中, F_{up} 为云受到的浮力; g 为万有引力常量; p 为大气压力; t 为时间; V 为云的体积; R 为普适气体常量; μ_A 为空气分子的平均分子量; T_A 为空气温度; μ_C 为云气分子的平均分子量; T_C 为云的温度; $\tau = \frac{c_p m_C}{\alpha m_A}$, 式中 c_p 为常压下云的热容; α 为常量; m_C 为云质量; m_A 为空气质量.

为了表示风的作用, 还加入了摩擦力参数 F_{FR} .

$$F_{FR} = C_{FR}(V_{wind} - V_{cloud})$$

其实现过程如图 2.

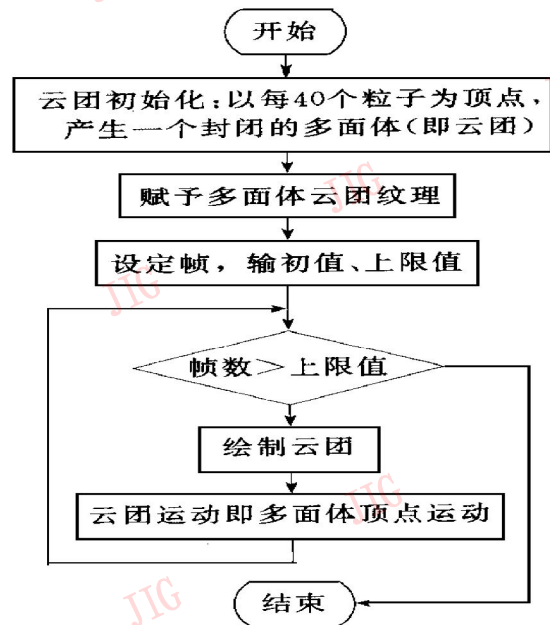


图2 云粒子系统流程

1.2 基于细胞自动机的火焰模型

1991 年 Pakeshi 等提出了基于细胞自动机的火焰模型^[3], 认为火焰等气体现象都是由简单的组元构成的. 组元虽然很简单, 但他们的组合形态和系统行为则非常复杂, 甚至可以产生无法预测的延伸、变形等复杂形式, 以至于不能简单地化为某种数学描述, 在 Pakeshi 的火焰模型中, 用一些简单的初始值

和简单的状态转换规则来描述火焰的动态变化,每一细胞单元有三个状态变量,即温度、燃料密度和气体流向,通过改变细胞变量的初始值,可以得到各种不同的图象.该火焰模型组成如下:

- (1) 网格空间的确定,网格点即细胞,如二维网格可看作是平面上一点.
 - (2) 用以描述每个细胞的状态.
 - (3) 由一状态(t 时刻)确定下一状态($t+1$ 时刻)的演化规律.
 - (4) 给出初始状态.
 - (5) 指定环境的作用.
- 图 3 给出了实现过程.

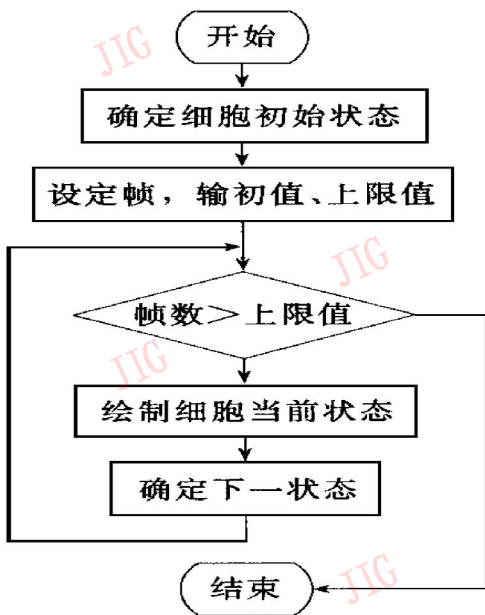


图 3 细胞自动机模型流程

1.3 基于分形几何描述的云模型

利用分形几何,先定义出云的形状,然后运用光照效果将该形状表现为云团.在建立云的分形模型过程中,把云的基本形状定义为简单的球体,并在不同的方向上对这些云球作某些变形,然后将初始云球随机缩小,并在不同方位上偏离父球中心的微小位移处进行多次随机复制,该过程一直继续下去直到最后的迭代层次(或达到小于一个屏幕象素)为止,最后绘制出这些缩放后的球.同时,为了建立云的更逼真的外观,把球的色彩看作是它到地面高度的函数,较黑的灰色用于云的较低部分,随着高度增大,灰色逐渐变淡,通过颜色密度和放大倍数简单改变,可以绘制出从乌云到白云的任何外观逼真的云团.

另一种云的分形模型依赖于等浓度线思想^[4],等浓度线表示的是云量值,它反映出云层的厚度,其实现方法如下:

(1) 用向量跟踪法,将等浓度线的特征点提取出来,从而得到用多边形近似的等浓度线,并计算分形维数.

(2) 进行三角划分,得到三角形面片.

(3) 对每一三角形面片,用中点位移法进行递归分割以生成分形曲面,中点位移沿铅垂方向进行,计算公式为:

$$V = 2^{-(n-1)(D-1)} \times Gauss \times L$$

其中: D 为分形维数; n 为中点位移分割次数; $Gauss$ 为正态分布随机数; L 为边长.

(4) 云团形状显示

将云团考虑为由水蒸汽组成的微粒子层,用光的衰减模型表示.当光线通过微粒子层时,由于受到水滴及尘埃等微粒的散射作用,透视光强随着通过路径长度的增加而不断衰减.为简化计算,假设微粒子层的密度均匀,光线通过此模型时,透视光强 I_{out} 用下式计算:

$$I_{out} = I_{in} \times \exp(-\gamma L)$$

式中: L 为光线通过长度; γ 为衰减率; I_{in} 为入射光强.

设 P 为某一截面,其数学描述为 $Z = P(x, y)$,定义分布形状为这个截面与云团的轮廓围成的形体,若入射光的方向为沿 $-Z$ 轴的方向平行入射,从某个三角形面片的重心 $M_i(x_m, y_m, z_m)$ 出发引铅垂线求与截面 P 相交的交点.根据某光线在分布形状内通过的距离 L_i ,可算出光的衰减量 f ,和求出三角形的红(R)、绿(G)、蓝(B)值.

$$L_i = P(x_m, y_m) - z_m$$

$$f = 1 - \exp(-\gamma L_i)$$

$$R = G = B = W \times f, W \text{ 为象素值的最大值.}$$

定义如下截面,可获得鳞状云团的波浪形效果.

$$P(x, y) = A \cos(\alpha x) + B \cos(\beta y)$$

式中, A, B, α, β 为常数

1.4 基于扩散过程的火焰模型

关于火焰的传播,Perry和Picard从燃烧学出发,提出了用速度传播模型生成火焰的方法^[5],而Chiba等计算了燃烧物体的热交换^[6],Jos Stam在此基础上,从热力学定律出发提出了用扩散过程描述火和其它气体现象及其传播的方法^[7].

Jos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Navier-Stokes方程表示,完全

按这组极为复杂的非线性的控制方程进行仿真模拟几乎是不可能的,它要求做成千上万次迭代,计算费用十分昂贵.由于在计算机图形学领域中,只要求图形具有真实感,因而不需进行精确的物理计算.假定密度是个常量,即气体不可压缩,在给定风向条件下,可引入扩散方程来计算密度和温度变化,扩散方程为

$$\frac{dT}{dt} = K_T \nabla^2 T + T_s - T_L$$

式中, 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.

扩散方程抓住了许多气体传输现象的主要特征, Arrhenius 公式表示了火焰密度的传播模型

$$S_{\rho, \text{flame}} = L_{\rho, \text{fuel}} = v_a \exp \left[- \frac{T_a}{T_{\text{fuel}}} \right] \rho_{\text{fuel}}$$

其中, ρ_{fuel} 为燃料密度; T_a 为激活温度; T_{fuel} 为指定点燃料温度; v_a 为常数.

当火焰冷却时,产生的烟的密度扩散模型为

$$S_{\rho, \text{smoke}} = v_b \exp \left[- \frac{T_{\text{flame}}}{T_s} \right] \rho_{\text{flame}}$$

其中, ρ_{flame} 为火焰密度; T_s 为烟雾生成温度; T_{flame} 为指定点火焰温度; v_b 为常数.

通过修改燃烧物体的温度和燃料密度来改变火焰的分布及运动,其实现过程如图4所示.

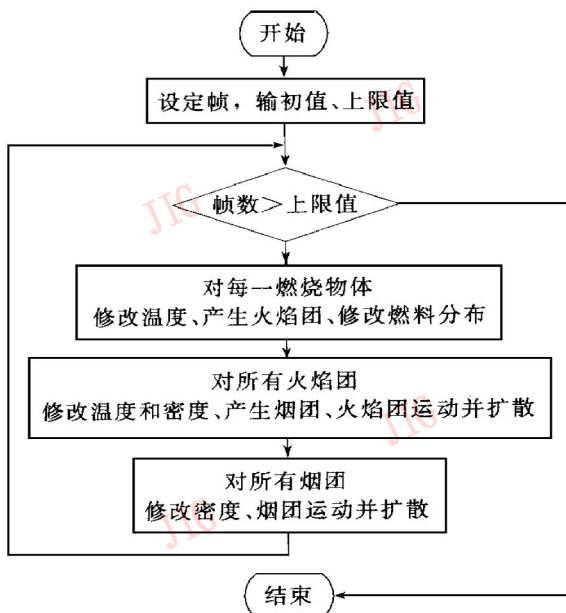


图4 扩散过程火焰模型实现流程

1.5 其它模型

最早由 Blinn 于 1982 年提出了描述云及烟尘表面的光反射函数; 1987 年 Nishita、Willis 等提出了低反照光模型^[8,9]; 1989 年 Kajiya 和 Rushmeier 提出了高反照光模型,用以绘制气体图象^[10-12];

1990 年, Sakas 用三维随机密度集为气体建模,并使用光线合成方法产生气体图象^[13].

1985 年, Perlin 和 D. S. Ebert 等提出用定义实体纹理的方法来表示气体及其运动,并通过变化纹理参数实现动画^[14,15],其根本原则是产生三维纹理映象.该纹理映象可以显式地定义为三维数组,也可由一过程函数定义,首先由此过程函数获得点的坐标,然后返回该点的表面; 1989 年 Inakage 用纹理映射的方法实现了二维火焰的简单模型^[16],即需要绘制出表面上一点时,就通过将三维点转换为二维纹理图案中的点来确定此点的颜色,此点的底纹颜色被输入阴影模型用来确定表面交点处的颜色; Geoffrey Y. Gardner 在 1985 年提出的云的模型是由天空平面、椭球体、数学纹理函数三个部分组成^[17],椭球体表示云的结构,并通过给出天空平面和椭球体加纹理的方法表现云.

除了以上的方法外,还有一些学者研究了不规则物体的建模方法,如: Jos Stam 和 Eugene Fiume 在描述烟、云、蒸气时,建立了风场中气体现象的紊流模型^[18-21],将流动的风场视为一个随机过程.

2 结语及展望

综上所述,不规则物体图形模型的研究方法大致分为五类:第一类是应用纹理映射的方法,这种方法难以获得具有真实感的运动图象,且人工痕迹极大,原因是其中没有表现物体运动本质的参数,适用于对图象真实感要求不高的场合;第二类是应用各种光照模型的体绘制方法,其主要缺点是场景中的所有元素都必须使用同一种绘制技术,这使得气体现象的模拟计算量极大,从而限制了使用;第三类是利用分形几何的方法,先描述物体大致结构的形状,然后再利用随机仿射变换或光照将物体表现出来.适于表现静止图象的精细结构;第四类是基于细胞自动机的方法,其特点是组元简单,但组合效果复杂,适用于低维情况下简单模拟的场合;第五类是从描述物体的运动过程来研究的方法(如基于扩散过程、粒子系统等),其优点是能够展现气体现象的动态特征,且真实感强,能够在虚拟场景中满足沉浸感的需要,难度在于运动规律的提取以及实时绘制.在这其中,粒子系统具有独特的优点:其一,粒子系统比较灵活,如其组成的粒子既可是最简单的点,也可以具有一定的结构,可根据描述的对象随意调整,且相对来说易于实现.另外,

表1 不规则模糊物体模型比较

模型	对象表示	运动表示	适用环境	计算代价	真实感效果
纹理映射	实体纹理函数	纹理参数变化	对图象真实感要求不高的场合	一般	真实感差
光照模型	密度集	光线变化	科学计算可视化	极大	真实感好
分形模型	分形集	分形参数变化	静止图象	不一定	静态逼真
细胞自动机	细胞网格	状态转化规律	运动图象, 中低平台	不一定	一般
物理过程	温度场、风场、密度场	Navier-Stokes 方程	科学计算可视化, 高端应用	极大	真实感强
扩散过程	粒子烟团	扩散方程	可视化, 高端应用	极大	真实感强
粒子系统	粒子图元	随机过程	运动图象, 多平台	不一定	真实感好

根据场景的特点, 对粒子的数量、时间以及硬件平台的需求不苛刻; 其二, 粒子系统的模型是过程化的, 在其中可加入随机过程, 因此, 获得精细的模型不需大量的设计时间, 但粒子系统在实现上最大的缺憾是当粒子数达千数量级时, 难以达到实时效果. 在最近几年对粒子系统的研究中, 一方面其应用范围日益扩大, 另一方面其实现技术的研究也向着并行化方向发展. 相信随着计算机技术的发展, 对不规则物体建模的研究会出现新的成果. 表1给出了用这些方法建立的模型其主要性能的比较.

在虚拟战场的研究中, 爆炸、火光、烟雾、燃烧等特殊效应是一个重要的组成部分, 其逼真程度直接影响着整个系统, 根据这类不规则物体的特点, 可选择粒子系统和分形相结合的方法来进行模拟, 其研究具有重要的意义.

参考文献

- 1 Revees William T. Particle Systems—A Technique for Modeling a class of fuzzy objects. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'83)*, 1983, 17(3): 359~ 376.
- 2 Unbescheiden Matthias, Trembilski Andrzej. Cloud Simulation in Virtual Environments. In *IEEE Visualization Proceedings*, 1998, 98~ 104.
- 3 Agui Pakeshi, Kohno Yuzo, Nakajima Masayuki. Generating 2-Dimensional flame images in computer graphics. *IEICE Transactions*, 1991, E74(2): 457.
- 4 胡瑞安, 胡纪阳, 徐树公等. 分形的计算机图象及其应用. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
- 5 Perry C H, Picard R W. Synthesizing flames and their spread. *SIGGRAPH'94 Technical Sketches Notes*, July 1994.
- 6 Chiba N, Muraoka K, Takahashi H, et al. Two dimensional visual simulation of flames, smoke and the spread of fire. *The Journal of Visualization and Computer Animation*. 1994, 37~ 53.
- 7 Stam Jos, Fiume Eugene. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'95)*, 1994, 29(4): 129~ 135.
- 8 Nishita, Tomoyuki, Miyawaki, et al. A shading model for atmospheric scattering considering luminous intensity distribution of light sources. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'87)*, 1987, 21(4): 303~ 310.
- 9 Willis P J. Visual simulation of atmospheric haze. *Computer Graphics Forum*, 1987, 6: 35~ 42.
- 10 Blinn J F. Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'82)*,

1982, 16(3): 21~ 29.

- 11 Kajiya, James, Kay Timothy. Rendering fur with three dimensional textures. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'89)*, 1989, 23(3): 271~ 280.
- 12 Rushmeier, Holly, Torrance Ken. The zonal method for calculating light intensities in the presence of a participating medium. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'87)*, 1987, 21(4): 293~ 302.
- 13 Sakas G. Fast rendering of arbitrary distributed volume densities. In: F H Post and W Barth, editors, *Proceedings of EUROGRAPHICS'90*. Elsevier Science Publishers B. V, 1990: 519~ 530.
- 14 Perlin K. An image synthesizer. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'85)*, 1985, 19(3): 287~ 296.
- 15 Ebert D S, Parent R E. Rendering and animation of gaseous phenomena by combining fast volume and scanline A-buffer techniques. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'90)*, 1990, 24(4): 357~ 366.
- 16 Inakage M. A simple model of flames. In: *Proceedings of Computer Graphics International'89*, Springer-Verlag, 1989: 71~ 81.
- 17 Gardner Geoffrey Y. Visual simulation of clouds. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'85)*, 1985, 19(3): 297~ 303.
- 18 Stam Jos, Fiume Eugene. Turbulent wind fields for gaseous phenomena. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'93)*, 1993, 27(4): 369~ 375.
- 19 Fournier A F, Fussell D, Carpenter L. Computer rendering of stochastic models. *Communications of the ACM*, 1982, 25(6): 371~ 384.
- 20 Max N, Crawfis R, Williams D. Visualizing wind velocities by advocating cloud textures. In: *Proceedings of Visualization'92*, Los Alamitos CA. IEEE CS Press. 1992, 179~ 183.
- 21 Sakas G. Modeling and animating turbulent visual computer. 1993, 9: 200~ 212.



张芹 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为计算机图形学、不规则物体建模.

谢隽毅 硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学与计算机动画.

吴慧中 博士生导师, 教授, 主要研究领域为计算机图形学、虚拟现实.

张正军 博士研究生, 主要研究领域为计算机图形学、不规则物体建模.