

# 基于粒子系统的爆炸效果仿真研究

华泽玺 王迎春 孙建顺

(西南交通大学电气工程学院 成都 610031)

**摘要** 针对目前诸如军事、铁路等领域事故爆炸仿真模型运算复杂、仿真效果较差的问题,提出了改进的仿真模型,该模型以粒子系统为基础,用定性、定量的随机变化模型代替爆炸物理过程的流体模型。将粒子发射速度参数与随机扰动速度参数相结合,建立通用仿真模型,通过给定不同的参数形成烟雾、火焰与爆炸碎片的具体仿真模型,可以有效降低爆炸效果模拟的计算复杂度。实验证明,该方法运算速度快,真实感强,可以满足各种爆炸效果的仿真需求。

**关键词** 视景仿真,粒子系统,爆炸效果,仿真模型

**中图分类号** TP391.9 **文献标识码** A

## Study of Explosion Simulation Based on Particle System

HUA Ze-xi WANG Ying-chun SUN Jian-shun

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** To solve the problems of computational complexity of the explosion simulation models in military and railway accident fields, this paper proposed an improved simulation model which is based on the particle system and replaced fluid model by the qualitative and quantitative random changing model. Our simulation model was established by the combination of particle emission speed parameters and random perturbations speed parameters, and it can reduce the computational complexity of the explosion simulation effectively by giving different parameters and forming specific simulation models for smoke, fire and debris. Experiment shows that this method has good operation speed and perfect simulation effect, and can meet the needs of various explosive simulation effect.

**Keywords** Visual simulation, Particle system, Explosion effects, Simulation model

## 1 引言

视景仿真是一种以图形学为基础的综合信息技术,被广泛应用于军事、铁路、航空航天等领域,爆炸效果则是视景仿真中的重要组成部分,其过程中会产生火焰、烟雾、碎片等可见现象,爆炸效果仿真主流方法是基于物理运动方程的求解计算,借助 NS(Navier-Stokes)方程来主导外在现象的表现<sup>[1]</sup>,即基于较为精确描述爆炸物理过程的流体模型。这类方法最大的优点是可以获得非常逼真的模拟效果,但模拟速度较慢,因而仿真效果受到了影响,爆炸效果模拟的方法计算要求越低越容易被更多的应用场合接受<sup>[1,2]</sup>。为此,笔者构建了新的模型,以求降低其运算的复杂度,论文在分析爆炸运动规律的基础上,设计了一种粒子发射速度与随机扰动速度结合的数学模型,同原有的方法相比,该模型具有计算复杂度低、运行速度快等特点,仿真效果可满足大部分应用场合的需求。

## 2 基于粒子系统爆炸效果的建模

### 2.1 通用模型的建立

#### 2.1.1 改进方法及原理

在视景仿真系统中,爆炸效果由火焰、烟雾、碎片来表现,

都是以粒子系统来实现的。粒子图元的形状可以是小球、立方体、正四面体或者其它不规则形体,采用大量具有一定属性的微小粒子图元作为基本元素可以绘制爆炸形成的非规则形体,期间粒子的各种属性随时间变化而变化,经过“产生”、“运动”和“消亡”3个阶段<sup>[3,4]</sup>,这体现出不规则物体运动的随机性。如果建立流体模型精确描述爆炸之后产生的烟雾与碎片等爆炸现象的运动轨迹,计算量相对较大,从而影响仿真效果。因此,论文提出了一种改进的仿真模型,依据人体感官上对爆炸的认识,对爆炸粒子的部分参数可以通过随机数据的方式给定,而不通过解方程来给定,从而简化仿真模型,降低其运算的复杂度。

#### 2.1.2 粒子运动模型

在现实世界中粒子运动的描述如图 1 所示,图 1(a)描述了随着时间的增加粒子运动速率的变化规律;图 1(b)描述了随着时间的增加粒子与爆炸源之间距离的变化规律,粒子在运动过程中受到阻力的作用,运动速率会逐渐减小。



(a) 粒子运动速率与时间关系曲线 (b) 粒子运动距离与时间关系曲线

图 1 爆炸云运动规律

到稿日期:2011-06-11 返修日期:2011-09-25 本文受教育部博士点基金(20090184120021)资助。

华泽玺(1968—),男,硕士,副教授,主要研究方向为计算机应用、检测,E-mail: huazexi@163.com;王迎春(1963—),男,硕士生,高级工程师,主要研究方向为铁路通信信号、计算机应用;孙建顺(1986—),男,硕士生,主要研究方向为计算机应用。

在仿真过程中,通过式(1)计算粒子在运动过程中的实时速度,其中  $damp$  为阻力系数,取值范围在  $0 \sim 1.0$  之间,  $\vec{v}$  表示粒子的实时运动速度,不同帧时刻的速度记为  $\vec{v}_{e0}, \vec{v}_{e1}, \vec{v}_{e2}, \dots, \vec{v}_{em}$ 。由流体力学可知,物体在流体中通过时所受流体粘滞阻力为  $F = \frac{1}{2} \rho C_d S v^2$ ,其中  $\rho, C_d, S$  可视为常数<sup>[5]</sup>,因此可以用常数  $k$  来取代,故得到阻力式(2),其中  $k$  根据具体模拟的粒子来设定。

$$\vec{v}_{e(n+1)} = damp * \vec{v}_{em} \quad (1)$$

$$damp = k \vec{v}^2 \quad (2)$$

在爆炸过程中,每个时刻粒子周围都存在气流的变化,作用力的合力会发生变化,因此粒子的运动方向具有随机性,使得采用随机的方式来简化爆炸仿真模型成为可能。粒子运动最重要的因素是描述粒子运动的速度以及速度随时间的变化,大量粒子运动具有如下两个性质,即整体运动具有一定的方向性和粒子个体具备一定的随机扰动性(即在初始的运动方向前提下,又有一定的随机改变)。因此粒子的运动可以表述为两个部分,一个是爆炸时有方向的初速度  $\vec{v}_e$ ,另一个是其它原因产生的随机方向性,例如,整体中在大量粒子存在的情况下,由于相互之间的不断碰撞,可以认为某个粒子的运动具有随机性,用一个角度值和一个速率表征,产生一个随机扰动  $\vec{v}_m$ 。所作视景仿真可通过布告板技术进行二维绘制,实现三维的视觉。因此可以建立二维模型,如图 2(a)所示,运动粒子的初速度为  $\vec{v}_{e0}$ ,随机扰动速度为  $\vec{v}_m$ ,再根据式(3)、式(4)可以得到粒子的实际运动速度  $\vec{v}_n$ (表示第  $n$  帧的速度)。式(3)中,  $\theta$  表示随机扰动速度  $\vec{v}_m$  与  $x$  轴的夹角,该值为  $0^\circ \sim 360^\circ$  中的一个随机数,通过  $\theta$  值来确定  $\vec{v}_m$  的方向,  $\vec{v}_m$  的大小通过系数  $k$  来进行计算。如图 2(b)所示,根据力学的基本定律可以将速度  $\vec{v}_e, \vec{v}_m$  进行分解,通过对应分量的相加来计算  $\vec{v}_n$  的值。式(4)给出了具体的计算方法,其中  $\vec{v}_{xm}$  表示  $\vec{v}_n$  的  $x$  轴分量,  $\vec{v}_{ym}$  表示  $\vec{v}_n$  的  $y$  轴分量。

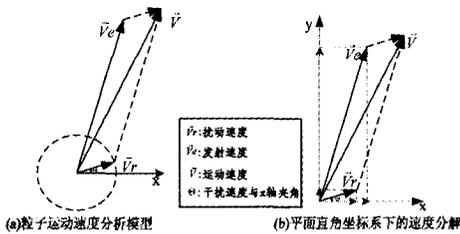


图 2 粒子速度分析

$$\begin{cases} \vec{v}_n = \vec{v}_{e0} + \vec{v}_m \\ \vec{v}_m = |\vec{v}_m| * \cos\theta + |\vec{v}_m| * \sin\theta \\ \theta = random(0^\circ, 360^\circ) \\ |\vec{v}_{e(n+1)}| = |\vec{v}_m| + k \end{cases} \quad (3)$$

$k$  为相关系数,其取值范围由具体的粒子类型来决定。

$$\begin{cases} \vec{v}_{xm} = \vec{v}_{exm} + \vec{v}_m * \cos\theta \\ \vec{v}_{ym} = \vec{v}_{eym} + \vec{v}_m * \sin\theta \\ \vec{v}_n = \sqrt{\vec{v}_{xm}^2 + \vec{v}_{ym}^2} \end{cases} \quad (4)$$

在得到粒子的运动速度描述之后,就很容易求得粒子运动的具体位置。设渲染帧之间的时间间隔为  $\Delta t$ ,粒子在各帧中的位置以  $p_0, p_1, p_2, \dots, p_n$  表示,则粒子位置计算如式(5)所示。

$$p_{n+1} = p_n + \vec{v}_n * \Delta t \quad (5)$$

### 2.1.3 粒子颜色、透明度、形状

真实世界中,火焰有内焰与外焰之分。为描述这一特性,采用一个随着粒子生存时间而变化的模型来计算颜色值,计算公式如式(6)所示,其中  $color$  表示火焰粒子的颜色,  $t$  表示粒子已生存时间,  $T$  表示粒子生命周期,  $function$  表示计算粒子颜色的函数,其具体计算由具体需要模拟的情况来决定。

$$color = function(t, T) \quad (6)$$

对于烟雾粒子来说,每一个粒子其明暗程度也不是统一的,因此采用随机给定透明度的方式来描述这一特性,如式(7)所示。  $alpha$  为粒子的透明度取值,  $0.0$  表示完全透明,  $1.0$  表示完全不透明,每一个粒子的透明度取  $0.0$  到  $1.0$  之间的一个随机值。

$$alpha = random(0.0, 1.0) \quad (7)$$

在爆炸过程中,会产生形状各异的爆炸碎片。粒子的不规则形状是采用纹理贴图的方式实现的,因此,可以为碎片提供一组不同形状的纹理,在生成碎片粒子时在每一组纹理中随机选取一个纹理,赋给具体的粒子,如式(8)所示,  $textures$  表示纹理数组,通过随机获取一个索引值,取得  $textures$  中的某一个纹理。

$$\begin{cases} index = random(0, num - 1) \\ texture = textures[index] \end{cases} \quad (8)$$

另外,为了进一步增强碎片的多样性,对碎片粒子进行一些随机的缩放与旋转,如式(9)所示,  $scale$  表示缩放参数值,  $x$  方向与  $y$  分别缩放,其取值范围由  $min, max$  来确定,  $angle$  为随机给定的旋转角度,旋转轴取  $z$  轴。

$$\begin{cases} scale = size(random(min, max), random(min, max)) \\ angle = random(0^\circ, 360^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

爆炸模拟整体效果在粒子创建时结合所需模拟的场景可设定一组合适的参数,从而达到比较理想的效果。

## 2.2 具体模型的实现

爆炸效果包含了烟雾、火焰与碎片三类爆炸现象,它们都可以采用上述粒子系统进行建模。它们共用同一个模型来描述粒子的运动属性、颜色属性,针对不同类型的效果,只需要设定合适的参数即可。

### 2.2.1 火焰粒子具体模型

伴随着爆炸的发生往往会产生火焰,从爆炸发生一瞬间开始到接下来的一段时间内会不停地有火焰现象,因此,火焰粒子从爆炸一瞬间开始产生,包括接下来的一段时间也要不间断地产生新的火焰粒子。火焰粒子的运动具有向上运动的趋势,因此火焰粒子的  $\vec{v}_{e0}$  取向上方向。火焰粒子从整体上观察还表现出一定的随机性,因此需要设定  $\vec{v}_m$  值。图 3 给出了对火焰粒子运动范围的分析。由式(3)可知,随机扰动速度取决于  $\theta$  角的取值情况。由于  $\theta$  角是随机取值的,其取值规律服从正态分布,因此粒子的运动速度也服从正态分布。具体火焰整体的形状需要结合仿真过程中的需求和  $|\vec{v}_{e0}|$  与  $|\vec{v}_m|$  的比值来共同决定。

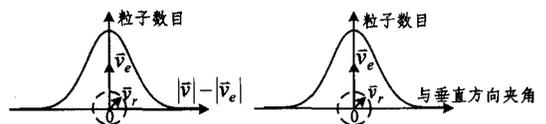


图 3 火焰粒子分布情况

另外,火焰会随着生存时间的不同,颜色发生有规律性的变化。因此,需要用式(6)来描述这一特性。一般情况下,火焰在刚产生的时候颜色偏白色,随后逐渐过渡到橙黄色。对于火焰粒子可以忽略透明度、纹理以及尺寸变化的问题,直接设定  $alpha$  为 1.0,  $textures$  只保留一个纹理,  $scale$  设定为 (1.0, 1.0),  $angle$  设定为 0。

### 2.2.2 烟雾粒子具体模型

烟雾与火焰有许多相似之处,其运动情况同样符合图 3 描述的火焰粒子分布情况。对于烟雾粒子可以不用考虑颜色变化问题,直接指定  $color$  为某一常数即可。与火焰粒子比较而言,烟雾粒子需要增加对其透明度的描述,其  $alpha$  根据式(7)进行取值。另外,烟雾粒子也无需考虑纹理以及尺寸变化的问题,  $textures$  保留一个纹理,  $scale$  设定为 (1.0, 1.0),  $angle$  设定为 0。

### 2.2.3 碎片粒子具体模型

碎片在爆炸一瞬间产生,接下来的时间不再产生新的碎片。碎片整体效果的特点是快速向四周喷射,因此,设定  $\vec{v}_0$  为零值,使得碎片离子不具有方向趋势。粒子的运动方向只由随机扰动速度  $\vec{v}_r$  决定。如图 4 所示,  $\vec{v}_r$  服从正态分布,  $radius$  也服从正态分布。

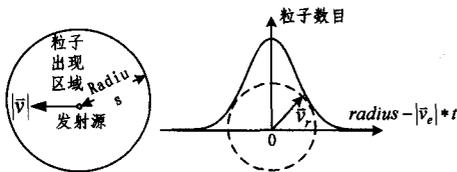


图 4 碎片运动分析

碎片的形状具有一定的随机性,因此可以通过式(8)与式(9)两种方式来解决该问题。首先,通过提供一组不规则的碎片纹理,在系统生成碎片粒子时随机选择其中的一个纹理赋给粒子,实现碎片粒子的形状各异。其次,如式(9)所示对粒子进行随机缩放与旋转,使得碎片离子产生更多的变化。碎片粒子不涉及颜色变化与透明度变化,这两个参数直接给定合适的常量。

## 3 爆炸效果仿真的实现

### 3.1 基本粒子实现关键技术

粒子系统是一组分散的微小物体集合,这些微小物体按照某种算法运动,粒子系统并不是一种绘制形式,而是一种动画方法,这种方法的思想是在粒子的生命周期内控制它们产生、运动、变化和消失。因此粒子具备位置、速度、阻力、大小、透明度、颜色、生命周期、已生存时间和生存标记等属性<sup>[6]</sup>。

#### 3.1.1 纹理贴图技术

爆炸过程中主要产生烟雾、火焰与碎片 3 种视觉现象,因此首先设计单个的烟雾、火焰与碎片爆炸效果的粒子。这 3 类粒子形状均为不规则形状,为了提高绘制效率采用纹理映射的方法来设计基本粒子。取纹理图片的透明度值与规则图元的颜色值进行混合作为规则图元的纹理,从而得到视觉上具有不规则形状的粒子。如图 5 所示,将烟雾粒子纹理图片与灰白色矩形图元混合得到烟雾粒子,将火焰粒子纹理图片

与火焰色矩形图元混合得到火焰粒子。将碎片粒子纹理图片与碎片颜色一致的矩形图元混合得到碎片粒子。如图 6 所示,碎片随机选中一种纹理,与灰白色矩形图元进行混合,得到不同形状的基本粒子。

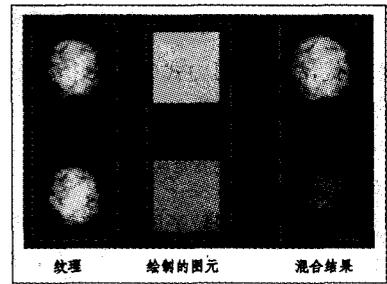


图 5 火焰与烟雾基本粒子

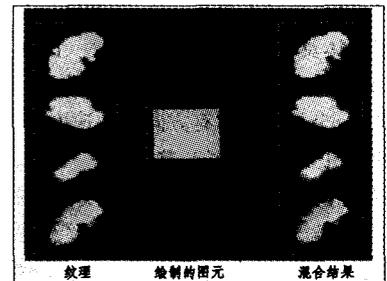


图 6 碎片基本粒子

### 3.1.2 布告板技术

上述方法设计的粒子是二维平面结构的,为了得到粒子的三维立体效果,采用了视平面对齐的布告板技术<sup>[7]</sup>使观察相机只能观察到粒子的正面。如图 7 所示,粒子所在平面始终与视平面平行。

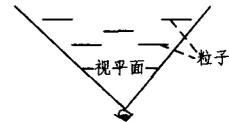


图 7 视平面对齐布告板顶视图

## 3.2 整体效果的实现关键技术

### 3.2.1 多态实现粒子类

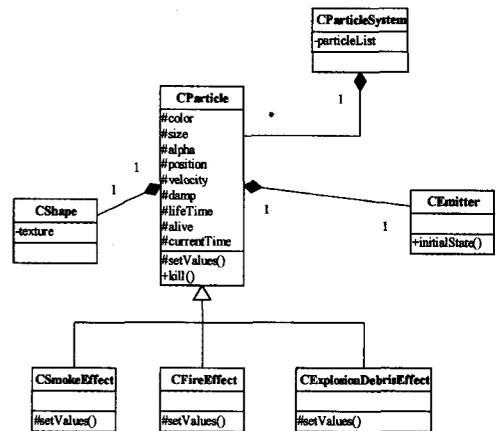


图 8 系统类图

仿真的实现使用 OpenGL 图形 API,设计了粒子系统类,如图 8 所示。CPparticle 为粒子基类,派生了烟雾效果子类

CSmokeEffect、火焰效果子类 CFireEffect 与碎片效果子类 CExplosionDebrisEffect 3 个具体粒子类。CShape 类的对象作为 CParticle 一个成员变量,负责维护粒子的形状与纹理属性。CEmitter 为粒子发射器类,该类的对象也作为 CParticle 的一个成员变量,即每个粒子都维护自己的发射器对象,发射器负责粒子产生时的一些参数设定,即对粒子的初始化。粒子本身具备的其他属性与方法由 CParticle 类或者其子类维护。CParticleSystem 为粒子系统类,维护所有的粒子对象。

### 3.2.2 粒子生命周期控制

单个粒子从产生到死亡过程的实现如图 9 所示,由粒子发射器产生新的粒子之后,将新产生的粒子加入到粒子系统的粒子列表中,每一帧图形绘制过程中,对粒子列表中所有粒子的生存时间与粒子生命周期进行比较,如果粒子生存时间超过生命周期则将该粒子从粒子列表中删除,否则进行粒子属性的相关计算,然后绘制该粒子。对于整体爆炸效果的模拟,每一帧绘制之前都会有一些新的粒子产生,也有一些粒子死亡。粒子的整体数量是一个从无到有,从少到多,然后从多到少,最后全部粒子死亡的过程。

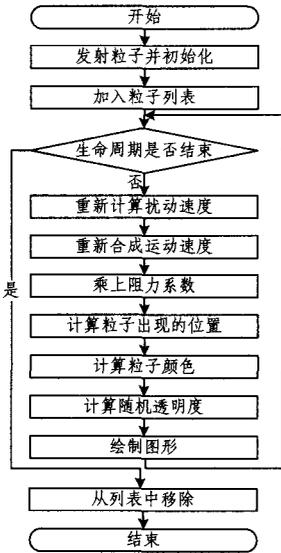


图 9 粒子生命周期

### 3.3 仿真分析

实验在 Intel Core i7-920 处理器、2G 内存、Nvidia Quadro 4600 显示接口卡、Windows XP Professional SP3 操作系统的电脑上进行。采用 C++ 编程语言、OpenGL 图形程序接口与 GLUT 用户交互界面,实现了爆炸效果的模拟,系统运行流畅,在只运行爆炸效果的情况下,图形渲染的帧率才可以达到 200fps 到 240fps 之间。由表 1 给定的参数得到的爆炸效果如图 10 所示。

对于爆炸云的模拟,典型的方法是对 NS 方程进行不可压和无粘性简化,然后结合粒子系统来渲染,此类方法基本可以做到实时模拟<sup>[8]</sup>。而对于物体运动、变形以及破碎的模拟,涉及到冲击波作用过程的刻画,模拟速度的瓶颈在于描述冲击波运动的 NS 方程的求解。但由于 NS 方程本身的复杂性,使得求解仍过于耗时。最快速的方法<sup>[9,10]</sup>渲染一帧仍需要几秒钟,难以满足虚拟现实应用对实时性的要求。

表 1 参数设定

粒子类型	发射速度 Ve	扰动速度 Vr	生命周期 T	阻力(k)系数	颜色 color(=function(t))
烟雾粒子	1	0.2	10	0.05	RGBA(255, 255, 255, 255) RGBA(255, 204, 51, 255)~RGBA(255, 102, 25, 0)
火焰粒子	1.2	0.8	4	0.1	R=255, G=204-32t, B=51, A=255-63.75t RGBA(127, 127, 0, 255)~RGBA(51, 51, 51, 127)
碎片粒子	0	10	1	0.15	R=127-76t, G=127-76t, B=51t, A=255-128t

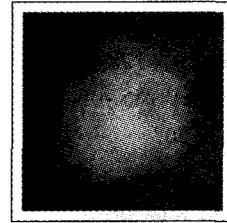


图 10 爆炸模拟效果图

而本文提出的方法,避免求解 NS 方程来精确描述碎片的运动轨迹,采用一种随机的方式来描述粒子的运动,从根本上解决爆炸模拟的实时性。

**结束语** 本文描述了以计算机图形学为基础建立的基于粒子系统的爆炸效果数学模型,根据烟雾、火焰与爆炸碎片的特征,针对粒子发射速度与随机扰动速度合成模型,运用 OpenGL 技术、布告板技术实现爆炸效果仿真。该方法可以应用于军事、铁路、航空航天等领域的模拟训练、系统仿真等,为爆炸效果的进一步研究提供了参考。

### 参考文献

- [1] 陈长波,等. 基于流场的爆炸分裂效果模拟[J]. 计算机工程, 2010, 36(11): 271-273
- [2] 孟效轲,等. 基于 OSG 的爆炸装置拆除视仿真及关键技术[J]. 计算机仿真, 2010, 27(7): 324-237
- [3] 李哲,等. 基于粒子系统的虚拟烟花的建模与绘制[J]. 长春工业大学学报:自然科学版, 2010, 31(4): 459-462
- [4] 王晓娟. 基于粒子系统动态烟花的模拟[J]. 青海大学学报:自然科学版, 2009, 27(4): 29-32
- [5] 陈皓,等. 椎体下落过程的空气阻力[J]. 河北师范大学学报:自然科学版, 2011, 35(3): 265
- [6] 李胜亮. 三维图形引擎关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007
- [7] 张博文. 基于粒子系统的烟火模拟技术的研究及实现[D]. 广州:华南理工大学, 2010: 29-30
- [8] Lars A. Animating Physically Based on Explosions in Real-time [C]//Proc. of the 5th International Conference on Virtual Reality, Computer Graphics, Visualization and Interaction. Afrigraph, South Africa; [s. n. ], 2007
- [9] Abhinav G. Explosion Simulation Using Compressible Fluids[C]//Proc. of the 6th IEEE Int'l Conf. on Computer Vision, Graphics and Image Processing; [S. l. ]. IEEE Press, 2008
- [10] Jason S. Visual Simulation of Shockwaves [J]. Graphical Models, 2009, 71(4): 126-138
- [11] 蒋恒恒,章国稳. 利用粒子系统实现喷泉模拟[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2008, 20(6): 749-753