

基于粒子系统的建模方法研究^{*}

张 芹 吴慧中 张 健

(南京理工大学计算机系 南京210094)

Study on Modeling Method Based on Particle System

ZHANG Qin WU Hui-Zhong ZHANG Jian

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

Abstract This paper describes the definition of particle system, also discusses the key techniques and problems of realizing of particle system. It gives a basic frame for applying particle system to modelling irregular objects.

Keywords Particle system, Virtual reality

粒子系统是不规则模糊物体建模及其图像生成的一种方法,由Reeves于1983年首次提出^[1],它采用了一套完全不同于以往造型、绘制系统的方法来构造和绘制景物,景物被定义为由大量随机分布的粒子集合组成,由诸多粒子的集合而不是个别粒子形成了景物的整体形态和特征以及动态变化。粒子系统充分体现了不规则模糊物体的动态和随机性,能很好地模拟火、云、水、森林和原野等自然景观,因此被公认为模拟不规则模糊物体最为成功的一种图形生成方法。

1 粒子系统组成及定义

粒子系统理论主要由以下部分组成:

① 物质的粒子组成假设。粒子系统中,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,这些粒子以连续或离散的方式充满它所处的空间,并处于不断的运动状态,粒子在空间和时间上具有一定的分布。

② 粒子独立关系假设。这里包含两个意思,一是粒子系统中各粒子不与场景中任何其它物体相交,二是粒子之间不存在相交关系,并且粒子是不可穿透的。

③ 粒子的属性假设。系统中的每个粒子并不是抽象的,它们都具有一系列的属性,如质量属性、存在的空间位置属性、外观属性(如颜色、亮度、形状、尺寸等)、运动属性(如速度、加速度等)、生存属性(生命期),其中颜色、亮度等属性随着时间不断地发生变化。

④ 粒子的生命机制。粒子系统中的每一粒子都具有一定的生命周期,在一定的时间周期内,粒子经历新生、活动和消亡三个基本生命历程。

⑤ 粒子的运动机制。粒子在存活期间始终是按一定的方式运动的。

⑥ 粒子的绘制算法。

下面给出粒子系统模型的形式描述:

定义1(粒子, Particle) 定义为实数域上的一个 n 维向量,表示为

$$P^n = \{Attri_1, Attri_2, \dots, Attri_i, \dots, Attri_n | n \geq 3, n \in I\}$$

其中, $Attri_1, Attri_2, \dots, Attri_i, \dots, Attri_n$ 是粒子的 n 个属性。一般包括:粒子的空间位置、运动速度及加速度、大小、颜色、亮度、形状、生存期以及剩余生存期等。单个粒子是组成粒子系统的基本元素。

定义2(粒子映射) 为上述单个粒子到正整数集的映射,其中每一个粒子具有一个索引,表示为 I_i 到 P^n 的映射。

$Q(t) = \{Pt: I_i \rightarrow P^n | I_i \subset J, n \geq 3, n \in I, t \in R\}$, $W(i) = P^n$ 为索引为 i 的粒子的性质和状态。

定义3(粒子系统) 为粒子映射集的有限集合,表示为 $S(t) = \{Q(t) | t \in \{t_0, t_1, \dots, t_m\}\}$, S 表示粒子系统在时刻 $t_0, t_1, \dots, t_m$ 的状态集合, $S(t_0)$ 是初始时刻粒子系统状态。

2 粒子系统建模的关键技术

应用粒子系统建模的关键技术是通过研究建模的对象,确定粒子的生存控制,描述粒子的属性,抽象出粒子的运动规律,提出粒子的绘制算法。

2.1 粒子的产生

无论粒子系统所表现的对象怎样,粒子总是产生在一定的空间范围内,如焰火的粒子系统中,火花粒子产生于爆炸的中心点处;在雨、雪的粒子系统中,雨点和雪花粒子在整个天空平面处产生;在瀑布的粒子系统中,水滴粒子在瀑布源头如山石缝隙处产生;在火焰的粒子系统中,火焰粒子在燃烧物表面产生;在空中爆炸的粒子系统中,爆炸碎片的粒子产生于一个球形区域内,而在地面爆炸中,可假设碎片粒子产生在装药范围内等等。图1是圆形、环形、矩形三种粒子产生的区域。除了确定产生粒子的空间范围外,还需研究粒子的初始分布规律。一般地,设产生的粒子的坐标为 x, y, z , 则它们满足一个约束方程,表示为 $f(x, y, z) = 0$, 且 x, y, z 服从某一概率分布 $P(x, y, z)$ 。



图1 粒子产生区域例图

粒子系统中粒子的产生分两部分,一是初始时刻产生的粒子,其数量在很大程度上决定了模糊物体的形态;二是为了补充系统中消亡的粒子,每隔一定的时间周期如每帧新生的粒子。粒子通过受控的随机过程加入到粒子系统中,在系统确

^{*} 本论文受“九五”国防预研项目4.3.3.7资助。张 芹 博士,副教授,主要研究方向为虚拟现实,不规则物体建模。张 健 硕士研究生,主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实。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。

定初始粒子数量时,一般采用以下两种方法:

① 给定粒子数量的平均值和随机变化范围,实际粒子数量由式(1)确定

$$NPartS_f = MeanPartS_f + Rand() \times VarPartS_f \quad (1)$$

其中:Rand()是一个返回在-1.0到+1.0之间均匀分布随机数的过程;MeanPartS_f是预先设定的粒子平均数;VarPartS_f是预先设定随机数分布范围。

② 生成新粒子的数量依赖于被描述物体在屏幕上显示区域的大小,预先设定的只是单位尺寸显示区域上粒子的数量及其随机分布范围,在生成新粒子时,系统根据透视投影参数计算出被显示物体在屏幕上所占区域的尺寸,然后依据该尺寸确定生成的粒子数。公式如下

$$NPartS_f = (MeanPartSsa + Rand() \times VarPartSsa) \times ScreenArea \quad (2)$$

其中:MeanPartSsa是预先设定的单位显示区域内粒子平均数;VarPartSsa是单位显示区域内粒子数的随机变化范围;ScreenArea是粒子系统显示区域的面积。

为了使系统在亮度上产生强弱的闪烁变化,每个时间周期(每帧)内产生的粒子数量也可由一个随机过程控制,如设定平均数及变化率,一般地可采用下列简单公式

$$MeanPartsf = InitialMeanParts + DeltaMeanParts(f - f_0) \quad (3)$$

其中 f 为当前帧数; f_0 为粒子系统激活的第一帧;InitialMeanParts为第一帧时的粒子数的均值;DeltaMeanParts为粒子数的变化率。

2.2 粒子的属性

对于每个新产生的粒子,系统都要赋予其一定的属性,在不同的粒子系统中,粒子可以有不同的属性,但一般都包括空间位置属性、外观属性、运动属性、生存属性等。空间位置属性包括初始位置坐标和方向。粒子的外观属性包括粒子的尺寸、颜色和形状。

① 初始尺寸 粒子大小决定了生成图形的粗糙度和分辨率。在实现过程中,粒子的尺寸体现了图形实时性和真实感的折中。

② 初始颜色 粒子的初始颜色分量包括粒子的三原色值(R,G,B)和粒子的透明度值(Alpha),粒子颜色的初始值由(4)式确定

$$InitialColor(R,G,B) = MeanColor(R,G,B) + Rand() \times VarColor(R,G,B) \quad (4)$$

$$InitialColor(Alpha) = 1.0$$

③ 粒子形状 最简单的粒子系统将粒子的初始形状设为点,在实现时只需用一个像素来显示。这样可将系统用于计算和显示单个粒子的时间复杂度减至最小程度。在较复杂的粒子系统中,单个粒子的形状可以采用线段、多边形、圆形、椭圆、球体等具有一定结构的复杂体素以取得较好的视觉效果。然而引入较复杂的粒子是以加大系统计算量,减少一定的实时性为代价的。

粒子的运动属性由初始速度描述。粒子的初始速度由速度大小和速度方向两部分组成,速度的大小可由式(5)确定

$$InitialSpeed = MeanSpeed + Rand() \times VarSpeed \quad (5)$$

其中 MeanSpeed 和 VarSpeed 是粒子系统中的两个系统参数,分别表示粒子的平均速度和随机变化范围。粒子的速度方向由特定的粒子系统模拟的规则物体特征决定,可以是某一固定方向或某区域内随机方向。

粒子的生存属性即生命期,它确定了粒子在系统中存在时间的长短,描述时间的单位可以是帧数或系统的时钟周期。

用帧数描述粒子生命期的优点是简单明了,实现容易,如在第 T 帧某个粒子的生命期可用式(6)表示

$$Lifetime(T) = InitialLifetime - T \times Attenuation_perframe \quad (6)$$

其中 InitialLifetime 是粒子的初始生命期,在粒子生成时由系统设定;Attenuation_perframe 是每帧的粒子生命衰减率,表示每经过一帧粒子减少的生命数。使用帧数作为粒子生命期单位的缺点是生成图形的复杂度将影响粒子生命期长度,从而带来时间单位的不确定性。例如,在复杂的虚拟环境背景中绘制不规则物体时,系统时间的开销将远大于在无任何背景的情况下计算和绘制同一个不规则物体所花的时间。因此系统生成一帧图形的时间也将随图形复杂度增加而增加,在复杂场景中一个爆炸过程持续的时间将大于在一个简单场景中持续的时间,从而造成图形真实感下降。

另外一种描述系统生命期的方法是采用系统的时钟中断作为粒子生命期单位。这种方法的优点在于使时间单位独立于生成图形的复杂度,消除了使用帧数作为时间单位所带来的粒子系统生命期依赖于绘制背景复杂度的缺点,从而提高了图形的真实感。然而,这种方法的缺点是系统要为粒子生命期设立时钟中断的消息映射,每次时钟中断时系统都要为每个粒子修改参数,增加了系统开销,在一定程度上降低了实时性。

2.3 粒子的运动状态

粒子动态描述了粒子在三维空间中的状态变化过程,状态变化包括粒子空间位置、速度、形态和颜色的改变。某一帧粒子空间位置可以由其速度和上一帧的位置得到。为了模拟复杂环境中粒子的运动,可以引入“场”的概念,如重力场、风力场、电磁场等,通过控制这些场的参数,就可以控制场中粒子的运动轨迹。粒子颜色、透明度和形态的变化通过控制相应变化参数来实现。最简粒子在三维空间中的运动可由式(7)简单描述:

$$V = V_0 + \int A dt \quad P = P_0 + \int V dt \quad (7)$$

其中 P 为位置, V 为速度, A 为加速度。粒子由于受到外力作用而产生加速度,使其运动方式发生改变,如常加速度运动,随机加速运动,只需修改加速度,其值相应地取常加速度、随机加速度。对于趋向一点的运动和趋向一线的运动,其加速度方向指向趋向的点或线,大小取决于粒子距点或线的距离。由于空气磨擦的作用,粒子将产生衰减运动。涡流将使粒子产生旋转,用旋转轴、旋转中心、涡流强度 magnitude 及密度 tightness 四个参数描述粒子的涡流运动,设 R 是粒子距涡流中心的距离, θ 是旋转角, θ 沿半径方向迅速衰减:

$$\theta = \frac{magnitude}{R^{tightness}} \quad (8)$$

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 P 是平面上一点, N 是指向平面的法向量,则可根据 $(X-P) \cdot N$ 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

$$V' = V - 2(V \cdot N)N \quad (9)$$

如果考虑磨擦和粒子弹性,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2所示。

$$V_n = (V \cdot N)N \quad V_t = V - V_n \quad (10)$$

若磨擦系数为 μ ,弹性系数为 ϵ ,则反弹后的粒子速度为

$$V' = (1 - \mu)V_t - \epsilon V_n \quad (11)$$

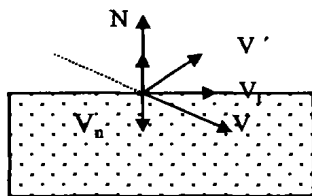


图2 粒子反弹

2.4 粒子的消亡

粒子产生后,经过一定的时间间隔,由于某种原因从系统中被除去的过程称为粒子消亡过程。通常粒子的消亡由两种原因引起:一种是由于粒子的生命期已经减少至零,表明粒子的寿命已到,成为死亡粒子而被粒子控制机制从系统中除去。另一种是粒子生命期尚未到零,但由于其它原因成为废弃的粒子从系统中除去。如由于粒子运动的空间位置超出了预先设定的区域或超出屏幕所能显示的区域,粒子的颜色已成为背景色或透明度已成为零等。

2.5 粒子的绘制

当某一帧的粒子状态被全部确定以后,粒子控制机制即调用绘制函数将其送往显示缓存,粒子的绘制与普通图形体素如多边形和曲线的绘制并没有多少区别,也存在遮挡、阴影和反走样等问题。由于粒子存在于三维空间中,每个粒子都带有其自身的深度信息,在绘制时也要解决遮挡、阴影和部分透明物体重叠等绘制规则图形体素要解决的问题,并且基于粒子系统的不规则物体可以与基于面片的规则物体存在于同一场景中。

(1)点粒子的绘制 在Reeves的粒子系统中,为了简化绘制算法,作了两条假设:首先假设粒子系统中的所有粒子都以点光源(粒子光源)绘制,这样假设的目的是避免在解决遮挡和碰撞时对大量粒子进行 z 轴上的深度排序,从而减少了大量机器时间。在以点光源形式绘制粒子时,映射在任何像素上的光强和颜色都可以看成所有映射在该点的粒子的光强和颜色的简单叠加,从而避免了大量排序操作。此外这条假设中包含了一条隐含假设,即粒子光源的光强独立于粒子到视点的空间距离,光强不随粒子到视点距离的增加而减小,因此映射到同一像素上的各粒子的光强可以不必经过深度排序而直接简单叠加。其次,假设绘制时只考虑不规则模糊物体本身,即粒子系统中的各个粒子与虚拟环境中的其它规则物体不会出现交错、融合与碰撞检测计算,因此只对系统中的粒子进行绘制。

(2)面粒子的绘制 为了显示更多的空间信息,Stolk和Van Wijk提出了面粒子的方法^[2],他们把粒子造型为非常小的、能反射有向光源的面片,用这些面粒子可构造出离散的流面和时面。每个面粒子都有几何和时间属性,为了计算粒子的光亮度,在面粒子上附加法矢,法矢取决于显示面的类型,而显示面的类型又由粒子源的形状和粒子的释放时间决定。粒子源定义了粒子的起始位置,初始粒子可以规则地或随机地分布在线段的长度上、多边形的区域内或实体的面上。粒子可以连续地或离散地以等间隔的时间间隔或随机地释放,面的透明度依赖于粒子的密度。如果粒子源连续地释放点粒子,产生的是流线,如果粒子源连续地释放线粒子,则产生流面。面粒子的绘制之前,首先计算粒子的亮度和颜色,再经过裁剪将粒子变换到屏幕空间,然后经过扫描转换,最后被显示。Wijk将其用于3-D流场的可视化。

(3)线性粒子的绘制 Sims提出了一种适于并行实现的更一般更灵活的绘制粒子的方法^[3]。每个粒子都由一个头和

一个尾定义,头和尾都有自己的位置、半径、颜色、不透明度等属性。运动粒子的形状由两个圆组成,如图3所示。中间用切线相连,所有的参数都可由从头到尾的一个线性插值得到,不透明度从圆盘中心的1.0到边缘的0.0按线性函数或高斯函数逐渐递减。线性粒子绘制时,首先将粒子的头尾位置和半径转换到屏幕坐标系,其次将粒子分割为像素级的基片,这些基片包含颜色、透明度和深度信息,然后按深度进行排序,进行隐藏面计算,得到最终显示的像素的颜色信息,最后显示。

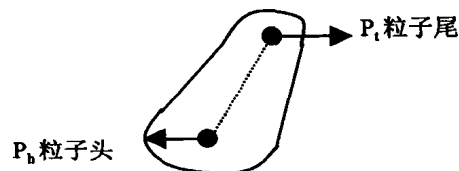


图3 线性粒子示意图

(4)随机形状粒子的绘制 Hin和Post用粒子方法来显示三维湍流场,他们从粒子的运动轨迹出发,将湍流分解为一个向前的运动和一个湍流运动,向前的运动直接由一个平均速度场描述,湍流运动由一个涡流扩散方程描述,在粒子路径生成的每一步,都加入一个由局部涡流扩散率决定的扰动,这形成了粒子的随机运动效果,大量粒子的整体行为模拟出一个很好的湍流效果。

3 生成粒子系统的基本步骤

图4给出了一个完整的粒子系统结构组成。生成粒子系统的一般步骤为:首先根据待描述的具体对象的外观特征,分析得到粒子的外观属性;然后研究所描述对象的运动及变化特点,抽象出粒子的运动和变化规律,再对所得到的属性进行定量描述;最后逐帧生成图像。即:

- (1)生一定数量的新粒子加入系统;
- (2)赋予每一新粒子以一定的初始属性;
- (3)除那些已经超过其生命周期的粒子;
- (4)根据粒子的动态对粒子进行变换及改变属性;
- (5)绘制并显示由有生命的粒子组成的图形。

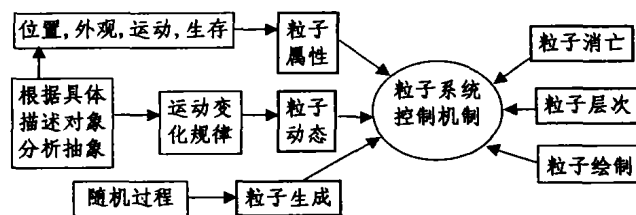


图4 粒子系统基本模型

结束语 本文系统地论述了粒子系统理论的主要内容,涉及模糊物体的粒子组成、粒子运动表示、粒子属性、绘制算法等。最后给出应用粒子系统方法绘制的火焰效果图(如图5,略)。

参考文献

- 1 Reeves W T. Particle Systems--A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects. ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'83), 17(3): 359~376
- 2 Stolk J, van Wijk J J. Surface Particles for 3D Flow Visualization, Advances in Scientific Visualization. In: F. H. Post and A. J. Hin, eds. Springer, Berlin, 1992
- 3 Sims. Karl -Particle animation and rendering using data parallel computation. Computer Graphics, 1990, 24(4): 405~413