

# 基于粒子系统方法的沉淀现象模拟

谭 良<sup>1,2</sup> 罗一帆<sup>1</sup>

(四川师范大学计算机学院 四川省可视化计算与虚拟现实重点实验室 成都 610068)<sup>1</sup>

(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)<sup>2</sup>

**摘 要** 液体中的沉淀现象是自然界和科学研究中的普遍现象之一,用计算机真实地再现沉淀现象对研究沉淀过程、掌握沉淀规律具有重要的现实意义。基于粒子系统方法,提出了沉淀现象的数学模型,详细描述了沉淀现象的实现过程,并讨论了沉淀现象实现过程中的实时性优化方法和真实感增强技术。实验结果表明,该方法不仅简单有效,易于理解,模拟的沉淀现象满足实时性和逼真性的要求,而且具有较好的通用性,根据需要稍做修改即可用于多种场合的沉淀模拟。

**关键词** 沉淀现象,粒子系统,OpenGL,虚拟现实

**中图法分类号** TP311 **文献标识码** A

## Simulation of Precipitation Phenomenon Based on Particle System Method

TAN Liang<sup>1,2</sup> LUO Yi-fan<sup>1</sup>

(Key Lab of Visualization in Scientific Computing and Virtual Reality of Sichuan, College of Computer,

Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)<sup>1</sup>

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Precipitation phenomenon in liquid is one of general phenomenon in nature or in research. It has very important significance for reappearing precipitation course and addressing precipitation disciplinarians by simulation. Based on particle system method, the mathematics model for precipitation phenomenon in liquid was brought out, and the implementation of precipitation phenomenon in liquid was particularly described, more over, the technologies for real-time and reality were discussed. It is demonstrated by experiment that the method is not only simply, easy, and satisfying for requirements of real-time and reality, but also has preferable commonality, it's fit for other occasion by little modify.

**Keywords** Precipitation phenomenon, Particle system, OpenGL, Virtual reality

## 1 引言

粒子系统主要用于不规则模糊物体建模及其图像的生成,基本思想是把不规则形状的物体看作是众多粒子所组成的粒子团,各个粒子都有自己的属性,如颜色、形状、大小、生存期、速度等。粒子随时间的推移而不断地改变状态,从而模拟出无规则的物体及其运动变化。从粒子系统方法诞生到现在,它已经逐步成为计算机图形学中应用最广、应用时间最长的方法之一。人们仍然在积极地对这种方法进行研究和扩展,不断地加以改进和完善,不断地拓展其应用的领域。

一般而言,创建特定的粒子系统是一个比较复杂的过程,不仅要考虑真实的物理模型和相应的动力学规律,而且还需要对粒子的大量属性分别进行设置。本文基于粒子系统方法,构建了沉淀现象的数学模型,详细描述了沉淀现象的实现过程,并讨论了沉淀现象实现过程中的实时性优化方法和真实感增强技术。最后,将该方法应用到化学反应的沉淀模拟中。

## 2 相关工作

从Reeves于1983年提出粒子系统作为模糊物体的建模方法<sup>[1]</sup>以来,已经出现了许多利用粒子系统来模拟自然现象的研究工作。1999年文献[2]运用粒子系统的一般原理,分析了雨点和雪花的静态和动态的属性特点,提出了基于粒子系统的雨点和雪花降落的实时模拟生成算法,并根据一定的原则对算法进行了一定的简化,从而实现了粒子系统在雨点和雪花模拟上的应用。文献[3]从计算流体动力学(CFD)的角度对灰尘的运动行为进行了3个阶段的细致分析,并且运用粒子系统的方法和图形学的其他相关技术加以实现,生成了较好的车轮灰尘效果。2000年文献[4]在粒子系统方法中引入涡流元素方法(VEM)作为模拟的动力学基础,在气体体积里面估计粒子的密度,运用蒙地卡罗光线追踪来估计粒子的光辉,最后贴上粒子图,模拟了气体的运动变化过程。2001年文献[5]采用粒子系统方法对不同精细程度的火焰进行了

到稿日期:2009-02-18 返修日期:2009-05-18 本文受国家自然科学基金面上项目(No. 60970113),四川省科技厅项目(No. 2008JY0105-2),四川省教育厅项目(No. 07ZA091)资助。

谭 良(1972—),男,博士,副教授,主要研究方向为信息安全、网络计算,E-mail:tanliang@software.ict.ac.cn;罗一帆(1982—),男,硕士,主要研究方向为教育软件研究与开发。

模拟,还研究了模型参数的变化对显示效果的影响以及表现风力的随机过程,对火焰粒子在各个坐标轴上的正态密度分布进行了新的探索。2003 年文献[6]延伸了传统的粒子方法,运用二阶粒子系统的动力产生器发射视觉效果粒子,较好地模拟了烟、云和爆炸等现象,并结合使用空间细分算法减少了计算的工作量。2004 年文献[7]将粒子系统方法和纹理技术相结合,模拟了火焰燃烧的情景,用粒子系统的方法确定出一条变化的轮廓中心线,然后根据这条曲线向两边进行扩展,在大致确定了燃烧的范围之后,再进行一定规则的划分并填充纹理。这种方法简单、易于实现,但是模拟出的燃烧火焰是纯粹的 2 维结构,对于表现动态火焰燃烧的真实情节还有一定的局限性。

粒子系统方法历经了 20 多个年头,其应用领域得到了很大限度的扩充,已经成为计算机图形学中的一个重要手段和工具,并广泛运用于游戏和各类虚拟现实系统中。总结起来,在应用粒子系统方法时,需要注意两方面:一是自然现象模拟的真实性,这是评价应用此方法成功与否的重要标志,这就要求使用者深入理解自然现象,建立合适的模型;二是实时性,采用粒子系统方法模拟自然现象时,随着模拟场景中粒子数量的增加,对这些粒子的控制和处理就会变得比较繁琐,系统开销急剧增加,系统运行的速度也会相应受到很大的制约。这就要求使用者建立简单实用的模型来减少计算开销。

目前,应用粒子系统方法模拟自然现象多限定在火焰、云团、喷泉、爆炸等,对于液体中的沉淀现象,如化学反应中的沉淀物、水中的沙尘等,还很少有文献涉及到。而沉淀现象是自然界中常见的自然现象之一,用计算机真实地再现沉淀现象对研究沉淀过程、掌握沉淀规律具有重要的现实意义。

### 3 沉淀现象的数学模型

采用粒子系统方法对于自然现象的模拟关键在于运动模型的设计。粒子的运动模型是粒子运动状态在虚拟环境中的抽象表达,它描述了粒子在三维空间中运动状态的变化。粒子运动状态的变化主要表现在空间位置、速度、加速度上的改变。

粒子在液体中的受力分析如图 1 所示。

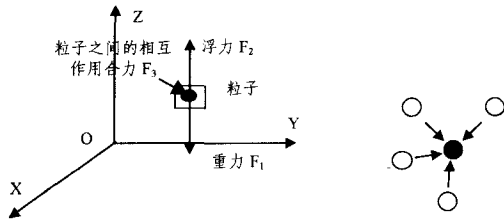


图 1 沉淀现象中的粒子受理模型分析

其中,  $\vec{F}_1$  是重力,方向向下;  $\vec{F}_2$  是浮力,方向向上。对于沉淀现象,  $\vec{F}_1 > \vec{F}_2$  总是成立的,否则就不是沉淀,而是浑浊或漂浮。另外,在液体中,需要考虑粒子之间的碰撞对粒子运动轨迹和最终沉淀位置的影响,  $\vec{F}_3$  是粒子之间相互作用的合力,由于大部分粒子具有向下运动的趋势,从上向下或从侧面碰撞的概率要大于从下往上碰撞的概率,因此  $\vec{F}_3$  的总体方向是侧向下。用  $\alpha, \beta, \gamma$  来表示  $\vec{F}_3$  的方向角,则  $\alpha > 180^\circ, \beta > 180^\circ, \gamma > 180^\circ$ 。忽略液体对粒子的粘滞力,则粒子所受合力可由式(1)求出:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \quad (1)$$

其中,

$$\vec{F}_1 = m\vec{g}$$

$$\vec{F}_2 = \rho g v$$

$m$  是粒子的质量,  $\vec{g}$  是重力加速度,  $\rho$  是液体的密度,  $v$  是粒子的体积。对于特定的粒子,参数  $m, \rho, v$  可以看成是已知的。根据牛顿第二定律得到粒子在合外力作用下的加速度为:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3}{m} = \vec{g} + \frac{\rho g v + \vec{F}}{m} \quad (2)$$

粒子的速度则由粒子的加速度和粒子在上一帧中的速度得到。因此可以用式(3)和式(4)对粒子在三维空间中的运动进行描述:

$$\vec{V} = \vec{V}_0 + \int \vec{a} dt \quad (3)$$

$$\vec{P} = \vec{P}_0 + \int \vec{V} dt \quad (4)$$

其中,  $\vec{P}$  为粒子的空间位置,  $\vec{V}$  为速度,  $dt$  为一帧的时间间隔,  $\vec{P}_0$  为粒子的初始位置,  $\vec{V}_0$  为粒子的初始速度。假设  $\vec{V}_0$  的方向角为  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ , 为了便于求解,将式(3)、式(4)展开成标量形式:

$$\begin{cases} V_x = V_0 \cos \theta_1 + \int a \cos \alpha dt \\ V_y = V_0 \cos \theta_2 + \int a \cos \beta dt \\ V_z = V_0 \cos \theta_3 + \int a \cos \gamma dt \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x = x_0 + \int V_x dt \\ y = y_0 + \int V_y dt \\ z = z_0 + \int V_z dt \end{cases} \quad (6)$$

然后采用 Euler 方法,通过粒子的速度来描述粒子空间位置的变化。

$$\vec{P}(t + \Delta t) = \vec{P}(t) + \vec{V}(t) * \Delta t \quad (7)$$

标量式如下:

$$\begin{cases} \Delta x = V_x \Delta t \\ \Delta y = V_y \Delta t \\ \Delta z = V_z \Delta t \end{cases} \quad (8)$$

将式(2)、式(5)代入式(8)就可以求出粒子单位时间内的位置变化。

对于沉淀现象中的粒子,由于受到液体的粘滞力、浮力和容器大小的限制,粒子有一定的运动范围,称为粒子的产生域。产生域控制粒子的活动范围,实际上是一个包围盒,其大小与液体的密度、粘稠度以及粒子的初始位置和速度有关。设产生域的长、宽、高为  $(H_1, H_2, H_3)$ , 则粒子的位置坐标应该满足如下限制:

$$x \leq H_1, y \leq H_2, z \leq H_3 \quad (9)$$

另外,沉淀现象中的每个粒子,都有一个存活时间的限制,称为粒子的生命周期。用  $t$  表示粒子的存活时间,  $T_0$  表示粒子的生命周期,则粒子的存活时间应该满足:

$$t \leq T_0 \quad (10)$$

因此,只要设定粒子的初始位置、初始速度、 $\vec{F}_3$ ,  $T_0$  以及产生域的大小,就可以确定粒子在任何时刻的位置。值得注

意的是,  $\vec{F}_3$ ,  $T_0$  以及产生域的确 定, 与具体的液体有关, 用户 可以通过试验测出这两个参数的经验值。

4 沉淀现象的实现过程

为了实现沉淀现象的模拟, 需要经历粒子初始化、粒子更新、粒子绘制 3 个主要过程。系统完整的工作流程图如图 2 所示。

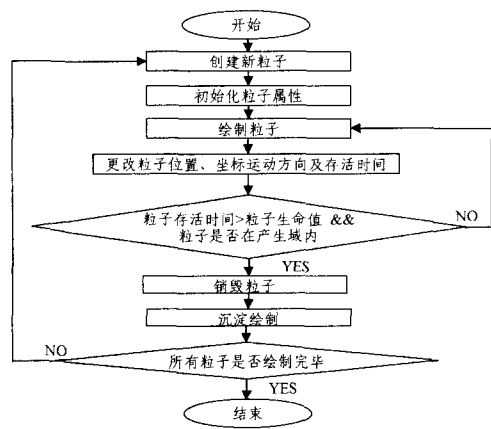


图 2 粒子系统工作流程图

系统初始化包含两个方面: 一方面是对粒子基本属性的初始化, 包括赋予粒子初始的位置、颜色、大小、加速度、速度、生命值等。另一方面是对粒子系统属性的初始化, 包括环境参数、产生域、纹理、粒子数量等。

在粒子的运动过程中需要更新的属性主要有位置、速度、生命值等。粒子运动状态主要通过对粒子属性的更新来实现。首先是粒子生命值更新。当图像每刷新帧, 就需要将每个粒子已存活时间加上粒子已存活时间增量与粒子生命值进行比较, 如果粒子已存活时间已达到其生命值, 则判定粒子死亡。同时检测每一帧粒子的所在位置, 如果粒子的运动空间位置超过所定义的产生域, 即判断式(9)是否成立, 如果不成立, 同样判定粒子死亡。其次是粒子速度的更新。在粒子更新过程中, 关键之处在于粒子速度值的更新, 因为粒子速度决定了粒子的运动模型。更新方法应按式(5)进行。再次, 粒子的颜色和透明度的更新。计算方法是将粒子前一帧时的颜色和透明度值分量加上颜色增量和透明度增量。

对于粒子的绘制, 就是以更新后的颜色和透明度值为基础, 在下一帧时视口的恰当位置再现粒子。绘制时, 不仅要考虑粒子的数量, 而且还要考虑粒子源的属性。粒子系统中的所有粒子都是由粒子源产生的。粒子系统的粒子源有两个重要的性质, 即粒子源形状 (Source Shape) 和粒子源大小 (Source Size), 它们一起确定了粒子发射平台的外形特征。

5 沉淀现象实现过程中的优化

沉淀现象实现过程中的优化主要包括实时性和真实感。一方面实时性增强真实感; 另一方面, 实时性和真实感又是矛盾的, 有的方法增强了实时性但降低了真实感, 有的方法增强了真实感但降低了实时性。

5.1 实时性优化

为了提高沉淀现象模拟的实时性, 用户可以根据具体情况, 在对真实感影响不大的情况下, 采取措施如下。

首先, 为了减少计算开销, 可以简化沉淀现象的数学模

型, 如, 在受力分析过程中忽略粒子之间的相互碰撞, 不考虑粒子之间的相互作用合力  $\vec{F}_3$ , 也不考虑液体对粒子的粘稠力, 这样可以减少大量的计算开销。

其次, 在粒子沉淀过程中, 为了减少分配和释放内存的操作给系统带来的负担, 可以将所有粒子都视为“不死”粒子, 在粒子消亡的时候给该粒子重新赋予生命值, 并初始化该粒子的其他属性。

第三, 尽量降低粒子源数目。粒子系统中的所有粒子都是由粒子源产生的。粒子系统的粒子源确定了粒子发射平台的外形特征, 从而决定了粒子产生的初始状态。如果粒子源大小设定为一个非零正数值, 那么粒子系统中的每个粒子都会随机地获得一个在给定粒子源形状和大小范围内的初始位置。如果设定的粒子源大小为 0, 那么不管使用何种粒子源形状, 所有的粒子都会从指定的特殊效果位置处产生。

最后, 在实现有生命粒子的绘制时, 采用什么形状的粒子将会影响系统的实时性。应该将粒子简化为矩形面片、圆等规则几何形状以尽可能减少系统绘制的开销, 然后采用纹理融合技术, 将二维纹理图片映射到矩形面片上, 纹理的颜色根据实际需要模拟的沉淀颜色进行设置。

5.2 真实感增强

为了增强沉淀现象模拟的真实感, 用户可以根据具体情况, 在对实时性影响不大的情况下, 采取措施如下。

首先, 在粒子绘制时, 为了增强粒子的真实感, 可采用色彩融合技术进行绘制, 所谓融合就是将某个像素的颜色和已绘制在屏幕上与其对应的像素颜色相互结合所产生的一种效果。其原理是在 RGBA 模式下, 设定不同的 Alpha 通道分量 (Alpha 通常为 RGBA 颜色模式的第 4 个颜色组成分量 A) 与融合函数中源颜色和目的颜色值所占的比例来实现粒子不同的颜色与透明效果。

其次, 为了增强沉淀现象的真实感, 在渲染的过程中采用了三维立体显示技术。人观测空间物体时产生立体感是由于物体在左右眼视网膜上的影像存在视差的缘故。利用该原理, 在粒子的绘制过程中先绘制出实体的模型, 然后通过设置左、右眼位置来产生两个不同视点的具有水平位差的模型画面。在戴上特殊的三维立体显示眼镜后, 双眼会融合这两幅图片, 头脑中就重构了一幅具有深度感的空间立体沉淀图像。

6 运用实例

根据以上讨论的方法及优化技术, 基于 OpenGL 技术, 模拟化学实验时试管溶液中产生的沉淀现象。沉淀的发生域限定在了以试管大小为基准的圆柱形空间中, 粒子源大小为 0, 坐标系统如图 1 所示, 其它相关参数的值如表 1 所列。

表 1 化学反应沉淀现象相关参数设置

| 属性                  | 属性值设置                       |
|---------------------|-----------------------------|
| 粒子个数 (N. Particles) | 30                          |
| 生命周期 (Life Circle)  | 5                           |
| $\vec{F}_1$         | 5, 方向垂直向下                   |
| $\vec{F}_2$         | 3, 方向垂直向上                   |
| $\vec{F}_3$         | 0.5, 方向角 (230°, 210°, 240°) |
| $\vec{V}_0$         | 2, 方向角 (260°, 280°, 200°)   |
| $\vec{P}_0$         | (0, 0, 0)                   |
| 液体粘滞力               | 不考虑                         |
| 产生域                 | 圆柱体                         |

模拟是在配置为 Pentium D 2.80 GHz 的 CPU、

DDR512MB 内存及 NVIDIA GeForce 7300 LE(256MB)显卡的 PC 机上进行的,当场景漫游系统中动态粒子数达到 900 时,场景漫游系统能够以 40 fps 的速度进行漫游。同时显示器的垂直刷新率为 60Hz,可以保证渲染图像显示跟屏幕更新保持同步。沉淀现象的效果如图 4 所示。

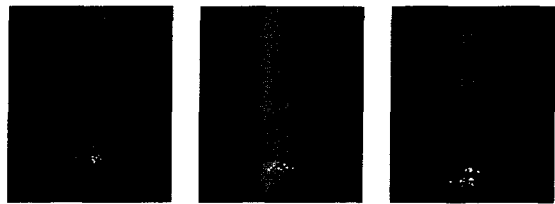


图 4 不同帧数下粒子运动沉淀效果

**结束语** 本文基于粒子系统方法,构建了沉淀现象的数学模型,详细描述了沉淀现象的实现过程,并讨论了沉淀现象实现过程中的实时性优化方法和真实感增强技术。基于 OpenGL 技术对沉淀现象的模拟进行设计,并在化学实验仿真项目中得到了实现。该方法在数学方法和绘制方法上都力求简化,以最简单的数学模型完成模拟任务,这样不仅使系统结构易于理解,而且提高了运行速度,具有一定的通用性,扩大了系统应用范围,只要对粒子速度模型中的随机参数稍作修改,该系统即可应用于其它现象的模拟,增强了系统的可移植性。

## 参考文献

[1] Reeves W T. Particle systems—A technique for modeling a class

of fuzzy objects[A]//Proceedings of SIGGRAPH'83[C]. Detroit, Michigan, USA, 1983;359-375

[2] 谢剑斌,郝建新,蔡宣平. 基于粒子系统的雨点和雪花降落模拟生成[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(9): 734-738

[3] Chen J X, Wegman E J, Fu X, et al. Near real-time simulation of particle systems[A]//Proceedings of International Workshop on Distributed Interactive Simulation and Real-time Applications (DISRT'99)[C]. Greenbelt, Maryland, USA, 1999; 33-40

[4] Adabala N, Manohar S. Modeling and rendering of gaseous phenomena using particle maps[J]. Journal of Visualization and Computer Animation, 2000(11): 279-293

[5] 张芹,吴惠中,谢隽毅,等. 基于粒子系统的火焰模型及其生成方法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(1): 78-82

[6] Ilmonen T, Kontkanen J. The second order particle system[J]. Journal of WSCG, 2003, 11(1): 1213-1218

[7] 林夕伟,于金辉. 基于粒子和纹理绘制的火焰合成[J]. 计算机应用, 2004, 24(4): 77-79

[8] 赵春霞,张艳,战守义. 基于粒子系统方法的三维火焰模拟[J]. 计算机应用研究, 2006(1): 244-245

[9] 童若锋,陈凌钧,汪国昭. 烟雾的快速模拟[J]. 软件学报, 1999, 10(6): 647-651

[10] 张芹,谢隽毅,吴惠中,等. 火焰、烟、云等不规则物体的建模方法研究综述[J]. 中国图象图形学报, 2000, 3(5A): 186-190

(上接第 257 页)

相似度公式  $\delta_H(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)| + |\nu_A(x_i) - \nu_B(x_i)|}{2}$ , 经计算得  $\delta_H(A, B) = \delta_H(A, C) = \delta_H(A, D) = 0.5$ 。而按照我们的直观理解, A 和 B 的相似程度应最小, A 和 D 的相似程度应最大。因而文献[10]给出的相似度公式在这个例子中失效。

下面利用本文给出的 IFH 包含度  $I_3$  和直觉模糊集之间的相似度公式  $S_1$ , 并取  $T(a, b) = a \wedge b$ , 经计算得  $S_1(A, B) = \frac{1}{3}$ ,  $S_1(A, C) = \frac{4}{7}$ ,  $S_1(A, D) = \frac{2}{3}$ 。

可见,这个结论更客观地反映了两个直觉模糊集之间的相似程度。

上述例子只是从一个侧面反映了本文构造的 IFH 包含度的应用价值。我们相信本文提出的 IFH 包含度理论对其它不确定推理分支也很有意义。

**结束语** 本文在已有的包含度理论的基础上定义了直觉模糊集上的混合单调包含度(即 IFH 包含度)。构造了几种具体的 IFH 包含度。证明了某些由剩余蕴涵算子生成的 IFH 包含度满足一定的分配性质和传递性。IFH 包含度在知识模式匹配中的应用为度量直觉模糊集间的包含程度提供了具体的方法,同时丰富了包含度理论和直觉模糊集理论。

## 参考文献

[1] Ma Z, Zhang W, Ma W. Assessment of data redundancy in fuzzy

relational databases based on semantic inclusion degree[J]. Information Processing Letters, 1999, 72: 25-29

[2] 张文修,梁怡,徐萍. 基于包含度的不确定推理[M]. 北京:清华大学出版社, 2007: 50-72

[3] Zhang H Y, Zhang W X. Hybrid monotonic inclusion and its use in measuring similarity and distance between fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160: 107-118

[4] Zhou L, Wu W Z. On generalized intuitionistic fuzzy rough approximation operators[J]. Information Sciences, 2008, 178(11): 2448-2465

[5] Atanassov K. Intuitionistic Fuzzy Sets: Theory and Applications[M]. Heidelberg: Physica-Verlag, 1999

[6] Bělohlávek R. Fuzzy Relational Systems: Foundations and Principles[M]. New York: Kluwer Academic, Plenum Publishers, 2002

[7] 张文修,吴伟志,梁吉业,等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2001: 168-170

[8] 徐章艳. 基于 Vague 集的近似推理[D]. 广西: 广西师范大学, 2004

[9] Li D F, Cheng C. New similarity measures of intuitionistic fuzzy sets and application to pattern recognition[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23: 221-225

[10] Hong D H, Kim C. A note on similarity measures between vague sets and between elements[J]. Information Sciences, 1999, 115: 83-96

[11] 刘华文. 直觉模糊与区间值模糊环境下的多准则决策与推理算法[D]. 山东: 山东大学, 2005