

基于粒子系统的实时雨模拟

李苏军, 吴玲达

(国防科学技术大学多媒体研究开发中心, 长沙 410073)

摘要: 基于流体动力学和粒子系统理论, 给出了一种实时生成三维雨的方法。算法以矩形基本粒子对雨粒子进行造型, 采用动态纹理映射技术和透明度扰动方法, 根据雨滴的降落运动方程, 来描述不同大小雨粒子受到重力和空气浮力、阻力影响时的运动效果, 采用与视点相关技术动态生成三维降雨场景。与传统的雨模拟算法相比, 该算法既正确模拟了雨的运动行为, 又降低了计算复杂性, 真实再现了雨的三维视觉效果, 在满足实时交互漫游的前提下表现出较强的真实感, 具有一定的实用价值。

关键词: 虚拟战场; 雨; 模拟; 粒子系统

Real-time Simulation of Rain Based on Particle System

LI Su-jun, WU Ling-da

(Multimedia R&D Center, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

【Abstract】 The paper presents a method on real time generation of cloud based on hydrodynamics and the particle system theory. It shapes the rain particle as rectangle. It simulates the cloud's radiometry using dynamic texture mapping and transparency disturbance, describes the cloud's movement using simple physical equations when different size particles suffered gravity, buoyancy and resistance. Compared with the traditional method of cloud's simulation, it can generate realistic visual effect of rain, accurately simulate the cloud's behavior and reduce the computing complexity, realize the 3D effects of rain. And it can interact in the 3D scenes of rain and as same as the real rain scenes, which proves its usefulness.

【Key words】 virtual battlefield; rain; simulation; particle system

1 概述

雨是虚拟战场场景可视化和战场态势信息的重要组成部分, 能否逼真而实时地生成雨画面, 直接影响虚拟战场的真实感和战场态势的表达。但由于雨是模糊对象, 没有光滑、定义良好和发光的表面, 其构成、动力学和光线交互等又非常复杂, 因此雨的建模与实时绘制一直是困扰计算机图形学的问题之一。文献[1]提出了用粒子系统模拟模糊物体, 并用大量的粒子来模拟火、爆炸效果。“雨场”可以看作是一种模糊物体, 因此可以用粒子系统模拟降雨。文献[2]基于粒子系统的基本原理分析并提出了适用的雨粒子系统和雨粒子的属性, 采用了把雨粒子产生区域定义为一个视图体顶部的外接长方体、用像素点和直线作为雨粒子的形状、降落过程的重力作用模拟、用粒子组实现雨粒子的连续补充和雨粒子的降落高度检测等新的方法及算法。该方法没有考虑风对雨的影响, 也没有考虑同一位置雨粒子大小的不同。文献[3]用粒子系统的方法仿真了降雨和下雪, 其研究重点是在满足视觉效果的前提下尽可能加快显示速度, 但没有给出雨滴和雪花在大气中运动时的运动分析方程, 雨点和雪花粒子属性的分析较为简略, 生成场景不够逼真。

为了改进上述算法, 本文基于空气动力学和粒子系统理论, 把雨滴看成球体, 建立其在空气中降落时的运动方程, 通过计算求解雨滴从初始时刻到匀速降落时段内各时刻的降落速度。算法以圆形为基本粒子对雨进行造型, 应用透明度扰动技术模拟雨的辐射变化。与传统的粒子系统相比, 可大大降低粒子的数量; 与纹理算法相比, 可生成具有动态变化的雨; 与基于空气动力学模型相比, 算法既保证了生成的雨具有一定的逼真度, 又具有良好的实时性; 与基于硬件的算

法相比, 此方法受硬件性能影响较小, 具有通用性, 能满足虚拟战场的应用需求。

2 雨粒子系统

2.1 雨的行为描述

模拟雨的行为, 其基础是研究与雨的行为相关的因素。这些因素包括雨的速度、气压、温度、外力、光照等。雨的行为大体可分为动力学行为和辐射性行为。

(1) 雨的动力学行为。雨具有可见的复杂表现和运动过程。实际观测表明, 雨滴的最小直径为 0.5mm, 最大直径不超过 6mm, 最大下降速度为 9m/s。由于不同大小雨滴达到匀速下降时存在速度差, 下降速度较快的大雨滴与下降速度较慢的小雨滴相遇就会聚合成更大的雨滴, 但随着雨滴体积的增大, 空气阻力也随之增大。当雨滴直径大于 6mm 时, 空气阻力超过了使雨滴保持整体的分子内聚力, 大雨滴便又碎裂分解成小雨滴。发生大雨或暴雨天气时的降雨就会出现上述现象。因此, 实际雨滴的落地速度既可能已经达到匀速极限速度, 也可能仍处在加速降落状态。本文假设加速以后都处于匀速运动状态, 效果理想。

(2) 雨滴的辐射性行为。雨滴吸收很少的光能。相反, 每一个水滴反射、散射几乎所有的入射光。几乎每个进入雨的光子在反射出来之前都经历了数次散射。从雨滴中射出的进入人眼的光, 对雨滴的表现是有影响的。因此, 雨滴的精确

基金项目: 国防预研基金资助项目

作者简介: 李苏军(1972-), 男, 博士研究生, 主研方向: 计算机图形学, 虚拟现实; 吴玲达, 教授、博士生导师

收稿日期: 2006-11-15 **E-mail:** lisujun2004@163.com

模拟需要对发生在其内部的光的反射和散射进行模拟。散射的复杂性使得精确的雨模拟几乎不可能实现。因而，必须采取简化或其他模拟方法，才能减小模拟的代价。

2.2 无风时雨滴自由降落运动方程

雨滴在空中的降落假设是由初始时刻速度为零开始的加速降落到阻力与重力平衡时的匀速降落过程，其运动微分方程即描述雨滴这一时段的自由降落过程。

设雨滴为圆球形，直径为 d ，密度为 ρ ，则质量为 $m = \frac{1}{6} \rho \pi d^3$ ，运动粘滞系数为 ν ，空气密度为 ρ_a ，与雨滴同体积的空气质量为 $m_a = \frac{1}{6} \rho_a \pi d^3$ ，方向垂直向下，重力加速度为 g ，下落距离为 z ，初始条件为 $t=0$ 时， $z=0$ ， $v=0$ ，设 $t=T$ 时，雨滴达到匀速极限下落速度，则在 $0 \leq t \leq T$ 时段雨滴自由降落过程中的作用力有：

重力： $F_g = mg$ ；空气浮力： $F_a = -m_a g$ ；加速降落产生的作用力： $F_v = -\frac{1}{2} m_a dv/dt$ ；空气粘性阻力： $F_f = \frac{1}{8} C_d \rho_a v^2 \pi d^2$ 。式中， C_d 为阻力系统，是雷诺数 $Re = v/V$ 的函数， $C_d \sim Re$ 。

由牛顿运动定律 $ma = \Sigma F$ ，得

$$m dv/dt = mg - m_a g - \frac{1}{2} m_a dv/dt - \frac{1}{8} C_d \rho_a v^2 \pi d^2 \quad (1)$$

代入 $m = \frac{1}{6} \rho \pi d^3$ 及 $m_a = \frac{1}{6} \rho_a \pi d^3$ ，并令 $\bar{\rho} = \rho_a / \rho$ ，化简整理后，得

$$dv/dt = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \bar{\rho}} \left[(1 - \bar{\rho}) g - \frac{3 \bar{\rho}}{4d} v^2 C_d \right] \quad (2)$$

式(2)即为雨滴降落的运动方程。模拟计算中取雨滴密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，空气密度 $\rho_a = 1.22 \text{ kg/m}^3$ ，时间步长 $h = 0.02 \text{ s}$ ，空气运动粘滞系数 $\nu = 1.493776 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ，重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，计算精度控制在降落速度误差小于 0.0002 m/s 时认为已达到匀速降落。根据数值模拟计算结果与实测雨滴速度比较，当雨滴直径 $d < 1.5 \text{ mm}$ 时，雨滴形状能近似保持球形。式(2)中的阻力系数是随下落雨滴周围气流运动状态而变化的^[4]：

$$\text{当 } Re \leq 1.0 \text{ 时, } C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right) \quad (3)$$

$$\text{当 } 1.0 < Re \leq 10.0 \text{ 时, } C_d = \frac{27.595}{Re^{0.8422}} \quad (4)$$

$$\text{当 } 10.0 < Re \leq 100.0 \text{ 时, } C_d = \frac{14.988}{Re^{0.5652}} \quad (5)$$

$$\text{当 } 100.0 < Re \leq 600.0 \text{ 时, } C_d = \frac{8.225}{Re^{0.4376}} \quad (6)$$

$$\text{当 } 600.0 < Re \leq 2000.0 \text{ 时, } C_d = 0.5 \quad (7)$$

$$\text{当 } 2000.0 < Re \leq 2500.0 \text{ 时, } C_d = 0.019 Re^{0.43} \quad (8)$$

$$\text{当 } 2500.0 < Re \leq 4000.0 \text{ 时, } C_d = 3.819 \times 10^{-4} Re^{0.929} \quad (9)$$

2.3 无风时雨滴匀速降落速度的分段公式

雨滴降落运动微分方程(1)是描述雨滴整个降落过程的一般方程，因此，也适用匀速降落过程。当雨滴达到匀速降落时，加速度 $dv/dt = 0$ ，则由方程(1)及方程(2)有

$$(m - m_a)g = \frac{1}{8} C_d \rho_a v^2 \pi d^2 \quad (10)$$

以雨滴密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，空气密度 $\rho_a = 1.22 \text{ kg/m}^3$ ，重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 代入式(10)得

$$v^2 = 1091.56 \frac{gd}{C_d} \quad (11)$$

对雨滴直径为 $0.5 \text{ mm} \leq d < 1.5 \text{ mm}$ ，将式(6)代入式(11)可得

$$v = 3.8435d^{0.9201} \quad (12)$$

式中，雨滴直径 d 以 mm 为单位，速度 v 以 m/s 为单位。

对雨滴直径为 $1.5 \text{ mm} \leq d < 4.0 \text{ mm}$ ，阻力系数公式适用式(7)，代入式(11)得

$$v = 4.6254\sqrt{d} \quad (13)$$

雨滴直径为 $0.5 \text{ mm} \leq d < 6.0 \text{ mm}$ ，降落速度近似为

$$v = 9.0 \quad (14)$$

综上，雨滴达到匀速降落时的极限速度分段公式为

$$v = \begin{cases} 3.8435d^{0.9201} & 0.5 \text{ mm} \leq d < 1.5 \text{ mm} \\ 4.6254\sqrt{d} & 1.5 \text{ mm} \leq d \leq 4.0 \text{ mm} \\ 9.0 & 4.0 \text{ mm} < d \leq 6.0 \text{ mm} \end{cases} \quad (15)$$

式中，雨滴直径 d 以 mm 为单位，速度 v 以 m/s 为单位。

在雨滴的运动中，影响雨可视特征且起主要作用的是雨的动力学式(1)，即雨滴所受的重力、空气浮力、加速降落产生的作用力和空气粘性阻力等，即 \vec{F} 。从而得到： $\frac{dv}{dt} \approx \vec{F}$ ，即

$$\frac{dv}{dt} \approx \vec{F}_g + \vec{F}_a + \vec{F}_f + \vec{F}_v \quad (16)$$

它们是雨粒子不断运动的动力。

在雨的辐射中，由于雨对光照的反射、散射计算非常复杂，使得精确地对雨的辐射性进行模拟几乎不可能实现，对光辐射性简化较难，本文没有考虑雨的辐射性。而是根据视点和雨滴位置的变化，通过动态纹理来模拟雨的辐射性，反映随着位置的改变，雨的视觉特征也相应改变。同时，通过引入粒子动态纹理，大大增强了画面的真实感。

2.4 粒子运动动力学

粒子系统并不是一个静态系统，随着时间的推移，系统中已有粒子不仅不断改变形状、不断运动，而且不断有新的粒子加入，并有旧的粒子消失。每个粒子的生命周期分为 3 个阶段：出生，生长，死亡。生成粒子系统某瞬间画面的基本步骤是：

- (1)产生新的粒子加入系统中。
- (2)赋予每一新粒子以一定的属性。
- (3)删除那些已经超过其生命周期的粒子。
- (4)根据粒子的动态属性对粒子进行移动和变换。
- (5)绘制并显示由有生命的粒子组成的图形。

2.4.1 新粒子的产生

在粒子系统中，新粒子的产生一般由一个随机过程控制，在每一帧或某一时间段，进入系统的粒子数由给定的平均期望值和最大方差来确定，其基本表达式为

$$N_{\text{particles}} = [\text{MeanParticles} + \text{Rand}() \times \text{VarParticles}] \times \text{ScreenArea}$$

其中，MeanParticles 和 VarParticles 分别是单位屏幕面积上所具有的平均粒子数和方差；ScreenArea 为当前模拟景物在屏幕上的投影面积；Rand() 是一个随机函数，其返回值在 $[-1, 1]$ 间，呈均匀分布。

2.4.2 更新粒子的属性

粒子的属性主要包括：位置、大小；运动速度和方向；颜色；透明度；形状；生命周期。

- (1)更新粒子的速度和位置

雨粒子的运动变化，采用式(16)来描述。

雨粒子的运动公式为

$$\begin{cases} m\vec{a}(t) = \vec{F}(t) \\ \vec{a}(t) = d\vec{v}/dt \\ \vec{v}(t) = d\vec{x}/dt \end{cases} \quad (17)$$

其中： m 为雨粒子的质量； $\bar{a}(t)$ 为粒子运动的加速度； $\bar{x}(t)$ 为 t 时刻粒子的位置； $\bar{F}(t)$ 为 t 时刻粒子所受到的作用力。

利用式(17)很容易求出每个时刻 t 时的粒子速度和位置。

(2)更新粒子的透明度

为模拟雨的辐射性和增强雨的真实感，根据视点和雨粒子位置的变化，通过动态纹理来模拟雨的辐射性，反映随着位置的改变，雨的视觉特征也相应改变。同时，通过引入粒子动态纹理，大大增强了画面的真实感。其透明度的计算方法为

$$\begin{cases} \text{Alpha} = \text{Alpha1} \cdot \text{Alpha2} \\ \text{Alpha1} = 1.0 - (r + g + b) / 3.0 + 0.1 \text{Rand}() \\ \text{Alpha2} = \sin \psi \end{cases} \quad (18)$$

其中： Alpha 、 Alpha1 、 Alpha2 为纹理的透明度； r 、 g 、 b 为纹理的颜色分量； ψ 为视点与雨中心连线和 xoy 平面之间的夹角。

2.4.3 粒子的消亡

在粒子系统中，当雨粒子生存期为 0 或超过屏幕区域时，该粒子即消亡。

3 雨的绘制

对于同一粒子，从任意两视点 P_0 和 P_1 所看到的雨粒子图像应基本相同，为此采用球作为雨粒子系统的基本粒子，以克服视点变化而造成的雨粒子形状的变化。而把球作为基本粒子，会遇到如下问题：球采用较多的三角形面片，会加大粒子绘制的开销，在同等条件下进行试验，采用球形粒子的绘制帧率为 20 帧，而采用矩形粒子的绘制帧率为 100 帧。为减小粒子绘制时的开销，可以作用的方法有：

(1)采用矩形作为雨粒子系统的基本粒子，对其纹理贴图后，生成视觉上的圆形粒子；

(2)调用 OpenGL 显示列表。采用此方法，存在一个问题，即从任意两视点 P_0 和 P_1 所看到的雨粒子图像不尽相同，为解决这一问题，采用面向视点的粒子生成，即矩形粒子平面始终与水平视线方向垂直。

OpenGL 显示列表(data lists)是被存储起来用于以后执行的一组 OpenGL 命令。它是为了提高图形程序性能和操作方便性而建立在 OpenGL 实现中的一类 OpenGL 处理机制。当一个显示列表被引用时，它包含的命令就以它们原来的顺序执行。

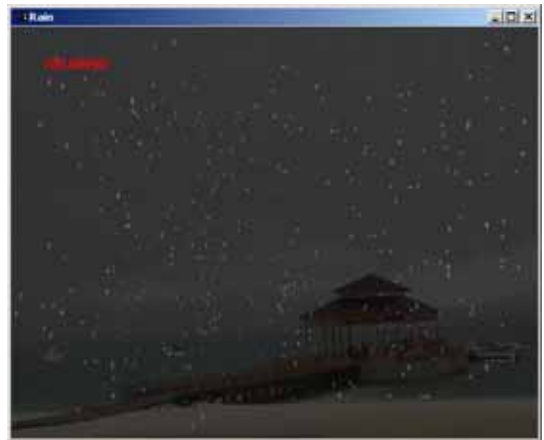
通常，利用显示列表方式绘图比直接绘制方式要快，尤其可以极大提高基于网格的绘图程序的性能，提高程序的运行性能。在本文中，把雨粒子的球形绘制程序及其纹理映射程序放入一个显示列表，以提高雨粒子绘制的效率。

通过对雨粒子位置属性的更新，确定某一帧所有粒子的位置后，即可通过绘制算法生成该帧的图像。在本文中，在每一粒子位置上直接调用 OpenGL 显示列表，生成雨粒子，将粒子的其他属性赋给粒子，使系统能根据时间、位置、视点等的变化动态地显示雨可视状态的变化。

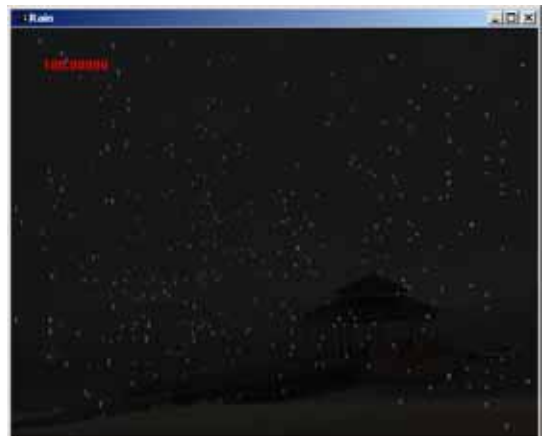
4 应用及结论

本文对基于粒子系统的三维降雨的模拟进行了研究，并

且在 PC 机上(CPU: 1.6GHz; 内存: 384MB; 显卡: 32MB)进行了实验,对雨分别使用了 200 个和 500 个粒子进行模拟,取得了满意的效果,在 500 个粒子模拟时,在 650 × 500 分辨率下可以达到 100 帧/s,达到了实时效果,其结果图形中的两帧不同时间的画面(如图 1 所示)。



(a)用粒子系统生成的傍晚雨景



(b)用粒子系统生成的黑夜雨景

图 1 实验结果(图形中的两帧画面)

因此，本文所述的基于粒子系统的雨滴生成算法十分适合应用于虚拟场景生成系统中。另外，该算法所使用的粒子运动方程还相对不够精确，没有考虑风对雨滴运动的影响，也没有考虑雨的大小，下一步将开展对随机风场条件下降雨模拟和小雨、中雨、大雨的模拟，提高模拟的针对性和模拟的真实感。

参考文献

- 1 Reeves W. Particle Systems—a Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects[J]. Computer Graphics, 1983, 17(3): 359-376.
- 2 罗维佳. 基于粒子系统的三维场地降雨实时模拟[J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(4): 495-500.
- 3 谢剑斌, 郝建新, 蔡宣平, 等. 基于粒子系统的雨点和雪花降落模拟生成[J]. 中国图像图形学报, 1999, 4(9): 734-738.
- 4 吕宏兴, 武春龙, 熊运章, 等. 雨滴降落速度的数值模拟[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 10-21.