

学号	姓名	论文规范性 (10)	问题分析与调研 (30)	方案创新性 (20)	实验结果分析与讨论 (40)	结课论文总成绩 (100)
21301006	杜晨阳	8	27	17	36	88

论文格式规范，组织结构较为合理，实验结果验证了技术方案的有效性

基于粒子系统的云雾湍流效果模拟与渲染

杜晨阳¹

1. 北京交通大学软件学院 北京 100044

摘要：在计算机图形学领域，逼真的自然现象模拟一直是一个富有挑战且具有吸引力的研究方向。云雾作为自然界中复杂且多变的气象现象，其真实感的模拟对视觉效果有着重要的影响。本文通过采用物理引擎来模拟现实世界中的各种力，使粒子运动方向和速度符合自然规律。此外，通过实现碰撞检测算法，确保粒子在遇到障碍物时能够产生反弹和散射效果，从而增强场景的真实感。为了模拟云雾的自然不规则性和湍流的随机性，应用噪声函数。对比实验证明，碰撞检测算法实现粒子湍流效果最好。

关键词：粒子系统；物理引擎；碰撞检测；

Simulation and Rendering of Cloud Turbulence Effects Based on Particle Systems

Abstract In the field of computer graphics, simulating realistic natural phenomena has long been a challenging and attractive research direction. Clouds and fog, as complex and variable meteorological phenomena in nature, significantly impact the visual realism of scenes. This paper employs a physics engine to simulate various forces present in the real world, ensuring that particle movements adhere to natural laws. Furthermore, collision detection algorithms are implemented to enhance scene realism by enabling particles to rebound and scatter upon encountering obstacles. To simulate the natural irregularities and turbulence of clouds and fog, noise functions are applied. Comparative experiments demonstrate that collision detection algorithms achieve optimal simulation of particle turbulence effects.

Keywords Particle system; Collision detection; Physics engine; Flocking behavior simulation

1. 引言

1983 年,Reeves 首先提出了粒子系统。粒子系统用非常简单的体素来构造复杂的物体,充分体现了不规则模糊物体的动态性和随机性,为自然现象如火焰、瀑布、雨、雪、草地和树木等的造型提供了强有力的技术手段。目前,已有多个利用粒子系统模拟自然现象的成功例子。

基于计算机图形学第二次小组实验的工作,在原本对于粒子系统的研究上进一步深入展开,通过引入多种物理引擎^[1]、流体力学模型、噪声等方法,对于云雾湍流这一动态自然现象进行模拟。

2. 相关工作介绍

近年来,模拟云雾效果的相关研究,从需求上讲大致可以分为满足视觉需求和具备实际意义两种,前者主要应用在影视游戏中用于增加场景的逼真度;后者可应用于气象分析、天气预报及军事仿真等领域,要求仿真结果与真实世界的时空背景相吻合,因此要以物理模型和数学模型为依据进行云雾效果模拟,这也是本文的研究思路。

目前针对满足视觉需求的云雾模拟,已经研究出了大量方法并广泛应用于工业界。其中常用的是采用非物理方法进行建模,不考虑云复杂的物理生成机制,而直接借助数学随机噪声等基于过程的方法来构建云的絮状外形,因此又被称为启发式方法。1985 年 Gardner^[2]率先将启发式方法用于云模拟,通过把不同类型的纹理映射到椭球体上来生成三维云图像。Lewi^[3]引入了程序噪声来处理云形状的变化。2001 年 PerGlin^[4]提出采用 3D 噪声对云纹理进行干扰以达到渐变的效果,其给出的 Perlin 噪声此后被广泛使用。2003 年 Joshua 等^[5]直接对 Perlin 噪声进行插值、衰减等操作,从而干扰生成云的密度场并绘制成云。最新成果是 Schneider 等^[6]开发的云系统,该系统使用 Perlin 噪声和 Worley 噪声的组合来完成云的建模,效果逼近真实云景。基于粒子系统的云模拟,最直观且较为理想的方法是直接从测量数据中获取云完整的三维浓度场,再对场数据恰当地可视化,但目前可获得的数据较少、分辨率低,在应用中过于粗糙。常用方法是基于云雾的物理生成机制进行建模,通过求解流体动力学和热力学方程来计算云的演化,也被称为数值模拟方法,其中较著名的是 Harris 等^[7]的研究成果,其效果较好但存在计算量大且效率低的问题。

3. 方法描述

粒子系统中的每个粒子都有一组属性,并且有着固定的渲染步骤。模拟云雾的湍流效果的方法有:物理引擎方法通过分析力的作用以及碰撞检测来模拟、采用经典湍流模型模拟、

添加噪声函数制造随机性。

3.1. 粒子系统的基本框架

粒子系统由大量粒子组成,每个粒子都有一组属性,如位置、速度、颜色和生命期等。粒子究竟有什么样的性质,主要取决于具体的应用。粒子系统是不断进化的,在生命期的每一刻,都要完成以下五步工作:

- (1) 粒子源产生新粒子并赋予粒子属性后加入系统中;
- (2) 根据粒子的动态属性对粒子进行移动和变换,同时更新粒子属性;
- (3) 判断粒子的生命值;
- (4) 删除超过其生命期的粒子;
- (5) 绘制并显示由有生命期的粒子组成的图形。

3.2. 物理引擎

(1) 物理模拟。以牛顿力学定理为基础,根据实体对象的物理属性,计算各种力对实体的作用,从而确定其运动状态。

(2) 计算各个实体对象所受的合力(Force)和合力矩(Torque)。合力采用向量叠加法计算,合力矩可用平行轴定理来计算。

(3) 进行碰撞检测。根据实体的运动状态检测它们之间的交互情况。一般的碰撞检测分为两个检测阶段:粗略检测阶段主要是利用物体的包围盒(AABB,OBB,Sphere),配合一种空间划分法(BSP,OBBTree)来进行粗略的层次型碰撞检测。目的是快速过滤掉没有发生碰撞的物体。如果物体的包围体发生碰撞,那么就进入到精细检测阶段进行更精细的判断。精细检测一般是基于三角形的碰撞检测,目的是找到确切的碰撞点坐标和碰撞法线。

(4) 如果有碰撞发生,响应碰撞并进行碰撞处理。一般用冲量定理来计算刚体碰撞后的速度。

另外,物理引擎不知道也不关心它进行模拟的对象是如何显示的。它根据对象的物理(而非图形)描述对这些对象的运动和交互过程进行模拟,该描述信息有可以用于生成“追踪”模拟的显示。对象物理特性的图形显示则交给图形渲染引擎来处理。

3.3. 流体动力学

Navier-Stokes 方程,描述了流体速度随时间的变化以及流体粒子之间的相互作用。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

- ρ 是流体的密度（单位质量/单位体积）。
- \mathbf{u} 是流体速度矢量场（单位长度/单位时间）。
- t 是时间。
- p 是流体的压力（单位力/单位面积）。
- μ 是流体的动力粘性（单位面积/单位时间）。
- ∇ 是梯度算子，表示一个向量场的局部变化率。
- $\nabla \cdot$ 是散度算子，表示一个向量场在某一点的净流出率。
- ∇^2 是拉普拉斯算子，表示一个标量场的二阶变化。
- \mathbf{f} 是作用在流体上的体积力（如重力）。

经典湍流模型主要基于流体力学中的 Navier-Stokes 方程，并引入了一些额外的假设或参数化方法来描述湍流的特性。

(1) 湍流动能 k 的输运方程：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}k) = \frac{\epsilon}{\sigma_k} + P_k - \rho D_k + \nabla \cdot (\mu_t \nabla k)$$

- k : 湍流动能，单位是 m^2/s^2 。
- \mathbf{u} : 流体速度场。
- ϵ : 湍流耗散率，单位是 m^2/s^3 。
- σ_k : k 的普朗特数，经验常数，通常取 0.7-1.0。
- P_k : 湍流产生率，单位是 m^2/s^3 ，由平均速度梯度产生。
- ρ : 流体密度，单位是 kg/m^3 。
- D_k : 湍流动能耗散项，通常假设等于 $2/3$ 乘以 ϵ 。
- μ_t : 湍流粘性，单位是 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ，与 k 和 ϵ 有关。

(2) 湍流耗散率 ϵ 的输运方程：

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\epsilon) = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 2} \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla k \cdot \nabla k - \rho C_{\epsilon 3} \epsilon + \nabla \cdot (\mu_t \nabla \epsilon)$$

- ϵ : 湍流耗散率。
- $C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\epsilon 3}$: 经验常数，通常取 $C_{\epsilon 1} = 1.42$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $C_{\epsilon 3} = 1.0$ 。
- σ_ϵ : ϵ 的普朗特数，经验常数，通常取 1.3。

3.4. 噪声函数

噪声函数在计算机图形学中常用于生成自然、随机的纹理和效果。本文主要应用噪声函数生成随机效果来模拟粒子的湍流运动，从而达到模拟云雾湍流自然现象的效果。

主要涉及两种噪声，Perlin 噪声和 Simplex 噪声。Perlin 噪声本身没有一个简单的公式，因为它是基于多个步骤和梯度计算的。Simplex 噪声是 Perlin 噪声的一种改进，使用一个称为 Simplex 的几何结构来代替原始 Perlin 噪声中的格子结构，从而减少计算量并提高性能。

4. 实验设置

实验设置包括电脑配置、项目开发环境的有关库设置、项目渲染设置。

4.1. 环境设置

本实验的电脑处理器配置是 13th Gen Intel(R) Core(TM) i9-13900H 2.60 GHz，系统类型是 64 位操作系统,基于 x64 的处理器。使用 OpenGL、GLFW、GLAD、GLM 和 STB Image 依赖库，通过 C++语言进行项目实验。

4.2. 项目渲染

项目的渲染步骤包括：

- (1) 设定一个包围盒，用于确定生成粒子的范围以及确定碰撞检测的边界。
- (2) 执行 `initialize` 函数。如果尚未初始化，则生成顶点数组对象（VAO）和顶点缓冲对象（VBO），并将粒子数据的内存大小分配给 VBO。设置顶点属性指针，启用顶点属性数组。
- (3) 执行 `render` 函数。先设置粒子的点大小。之后将更新后的粒子数据上传到 GPU 中的 VBO。绑定 VAO 并绘制粒子，使用 `GL_POINTS` 渲染每个粒子为一个点。
- (4) 在渲染循环中，执行 `update` 函数。对每个粒子，更新其位置基于其速度和时间差 `dt`。然后，进行碰撞检测，处理碰撞的粒子。添加湍流效果，通过随机噪声向量 `turbulence` 影响粒子速度。限制粒子的最大速度，避免粒子移动过快。函数最后需要衰减粒子的生命周期，直到当生命周期结束时粒子消失，随机位置生成新粒子。
- (5) 观察实验效果。

5. 实验结果与分析

本文尝试多种方法对于云雾湍流效果进行模拟，并通过对比实验主观效果，以及渲染帧时间来分析各个方法在性能上的表现。

5.1. 物理引擎-碰撞检测效果

针对碰撞检测，采用了两种方式进行添加。第一种是仅仅对边界的粒子进行碰撞检测第二种是在此基础上，添加粒子之间的碰撞检测。

图 1 为仅仅对边界附近的粒子进行碰撞检测，可以看到图中金色云雾的效果。

此外，第二种方法，经过编码尝试，由于粒子数目过多，计算量过大，项目运行的时候卡顿过大，每 2937ms 刷新一帧，刷新几帧后最后程序异常退出。分析代码，查找原因为粒子数目太多，计算量过大，计算时间复杂度为 $O(n^2)$ ，对于大量粒子来说效率较低，这里查

阅资料得知可以采用空间分区算法（如网格或四叉树）来加速碰撞检测。

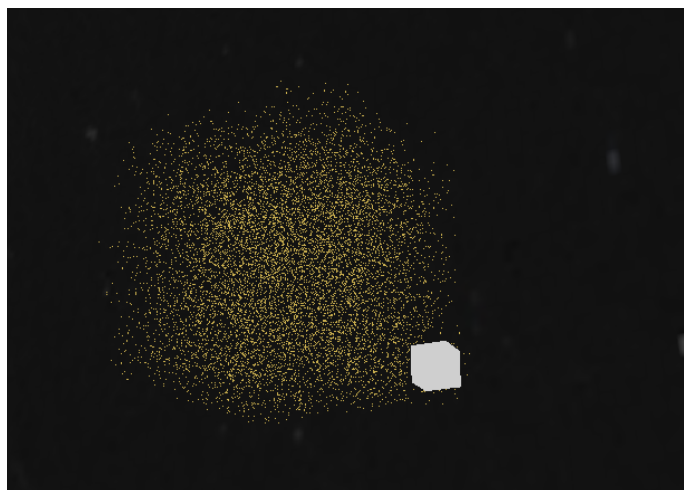


图 1 添加碰撞检测的效果静态展示

5.2. 经典湍流模型

这里对经典的湍流模型进行代码实现，其中，湍流粘性 μ_t 的计算公式中，经验常数 C_μ 取值为 0.9（经验值）。

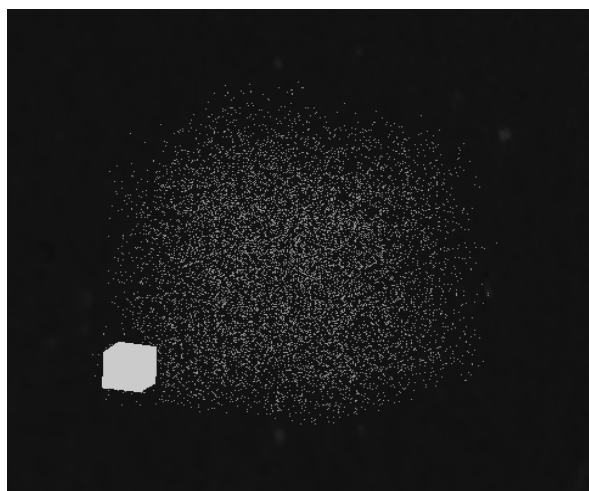


图 2 添加经典湍流模型的效果静态展示

5.3. 噪声函数

这里将噪声函数作为粒子系统的随机效果，从而模拟云雾湍流。动态效果与直接随机粒子的位置和速度并没有明显区别，粒子湍流效果模拟程度较低。

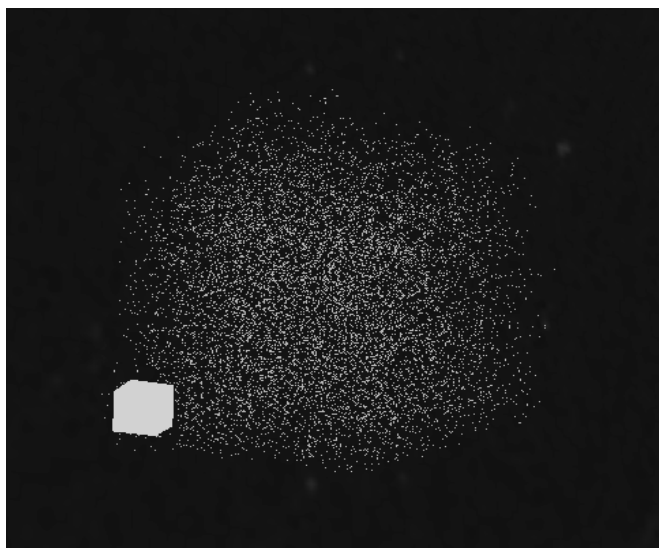


图 3 添加噪声随机效果模型的效果静态展示

5.4. 方法性能比较

针对于各种实现云雾湍流效果的方法进行主观原则的判断，一共分为五个等级：

- (1) 优秀：观察者认为湍流效果视觉效果很好；
- (2) 良好：观察者认为云雾的湍流模拟效果较好，有些地方细节存在问题；
- (3) 一般：观察者认为云雾湍流模拟效果一般，许多地方存在问题；
- (4) 较差：观察者仅能辨认出这是云雾湍流模拟的模型；
- (5) 很差：观察者认为与云雾湍流效果没有必然的联系；

表 1 云雾湍流效果各方法效果评估

模型	主观效果判断	帧时间/ms
边界碰撞检测	良好	0.042221
粒子碰撞检测	/	2937
经典湍流模型	一般	0.263111
噪声函数	一般	0.030302
混合实现方法	优秀	0.080348

6. 结论

综上所述，本文通过尝试多种方法来模拟云雾的湍流效果，最后通过对各种方法的实现逻辑进行简化并融合成为一个混合实现，以较高的性能和实验效果成功对云雾的湍流效果进行模拟。

不足之处在于，云雾湍流是个动态效果在文档中呈现效果不佳；没有找到更为合适的标

准去评价云雾湍流效果的模拟程度, 只能通过自己和舍友们的观察对于实验效果进行一个简单的评判。此外, 性能方面, 后续会尝试使用更高效率的模型去改进系统性能, 完成粒子间碰撞效果的实现。

参考文献

- [1] 欧阳慧琴,陈福民.物理引擎与图形渲染引擎绑定的研究与实现[J].计算机工程与设计,2008,29(21):5580-55825620
- [2] GARDNERGY.VisualSimulationofClouds[J].SIGGRAPH.ComputerGraphics,1985,19(3):297-304.
- [3] LEWISJP.Algorithms for Solid Noise Synthesis[C].Proceedings of the 16th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques.ACM,1989:263G270.
- [4] PERLINK.Noisehardware[C]Real Time Shading SIG.GRAPH Course Notes.2021:1-24.
- [5] JOSHUAS,JOSEPHS,DAVIDSE,etal.Arealtimcloudmodeling,rendering,andanimationsystem[C].Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH Eurographics Symposium on Computer Animation.Eurographics Association,Switzerland.2003:160-166.
- [6] SCHNEIDERA,VOSN.The realtime volumetric cloudscapes of horizon:Zero dawn[EB/OL].<http://advances.realtimerendering.com>.The Realtime Volumetric Cloudscapes of Horizon 2020 Zero Dawn 2020 ARTR.pdf.
- [7] HARRISMJ,BAXTERWV,SCHEUERMANNNT,etal.Simulation of Cloud Dynamics on Graphics Hardware[C].Proceedings of the ACM SIGGRAPH Eurographics Conference on Graphics Hardware.Eurographics Association,2003:92-101.