



# 三维环境的烟雾模拟

## 3D Smoke-Sim

Team: 刘德欣 1500017704,  
张煌昭 1400017707  
From Yuan Pei College



- Part 1 问题描述
- Part 2 两大流派
- Part 3 实现方法
- Part 4 实验结果
- Part 5 参考文献



# 1 问题描述

## 1

### 为什么要模拟烟雾

烟雾是常见的场景，图片处理时可能需要添加烟雾效果...

游戏中的硝烟等不仅影响视觉感受，而且会对游戏体验造成很大的影响...

... ..

... ..

... ..

## 2

### 为什么难模拟烟雾

烟雾的光学性质复杂，不同的浓度、颜色等会有不同的光学效果...

烟雾不定形，而且没有明确的轮廓，难以使用常用的图形进行描绘...

烟雾绘制的速度和逼真度难以兼得，往往顾此失彼...

... ..

... ..

... ..



# 2 两大流派

## Part Two 两大流派

### 1

### 粒子派

将烟雾视为粒子的集合。

每个“粒子”在物理上包含一小团烟雾的固、液实体和周围区域的空气。

每个粒子具有其RGB颜色、Alpha值、位置、速度、加速度等一系列物理属性参数，这些参数会在每一轮迭代中按规律进行更新。

粒子只能由粒子源发出，发出时设定粒子的生命周期，生命按照迭代轮数进行计时。

粒子只能在其生命周期内存活，一旦生命周期结束，或物理属性更新到值域之外，粒子消亡。

类似于蒙特卡洛法，速度较快，实现简单，支持实时绘制，真实性不强。

### 2

### 流体派

将烟雾视为流体，求解该流体的运动。

烟雾区域中的固、液、气的总和一起被视作一团不可压缩的流体。

流体一般使用N-S方程进行精确描述，其中流体由速度场和浓度场进行描述。

速度场描述了流体每个位置的速度矢量；速度场会在下一轮迭代中以迁移的方式直接引起浓度场的变化。

浓度场描述了流体每个位置的浓度；浓度场会在下一轮迭代中以扩散的方式直接引起浓度场的变化。

符合物理规律，真实感较强，速度慢，几乎不可能实时精确绘制，实现复杂，需要对N-S方程进行很多化简

### 1

### 粒子派

将烟雾视为粒子的集合。

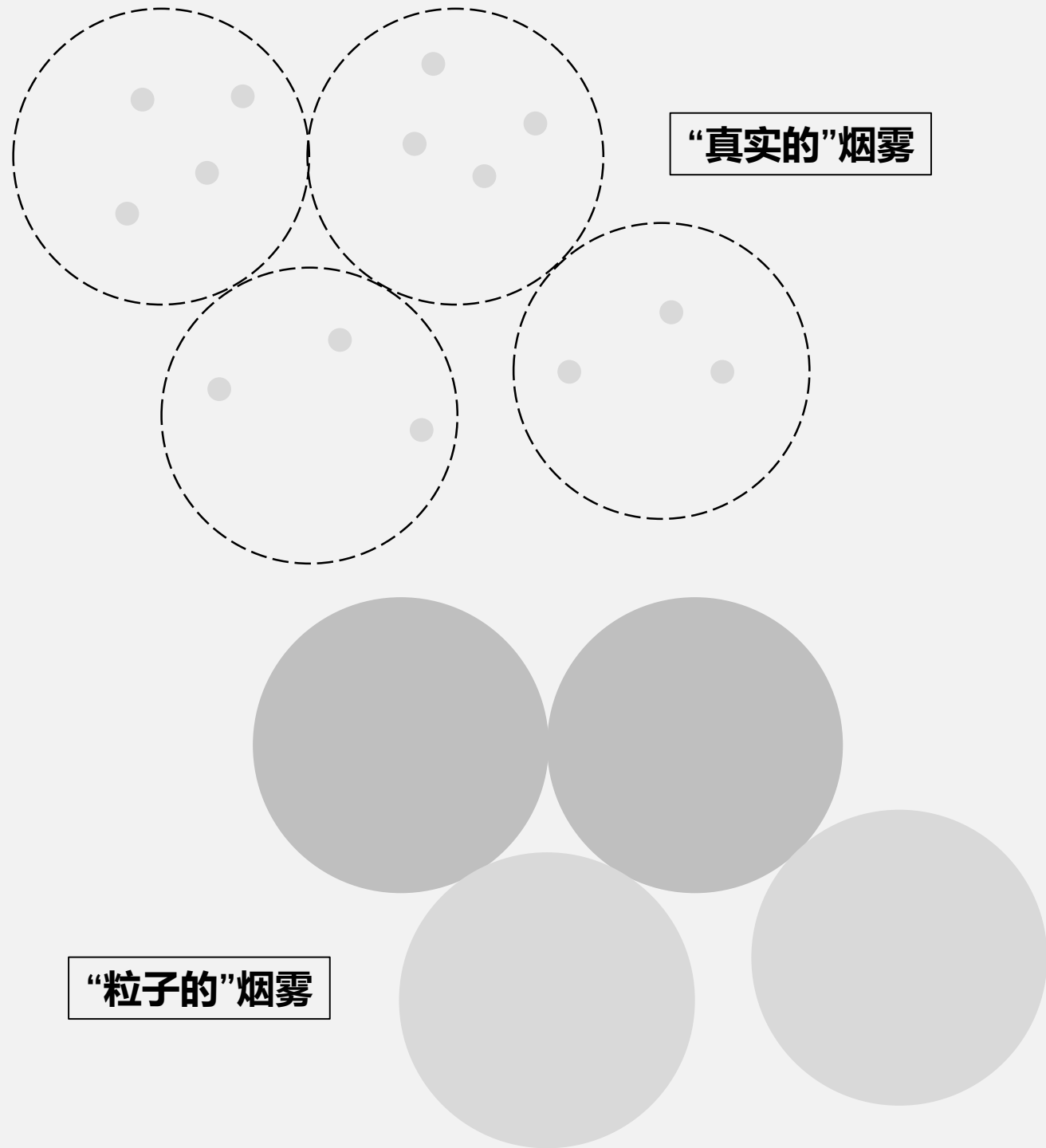
每个“粒子”在物理上包含一小团烟雾的固、液实体和周围区域的空气。

... ..

... ..

... ..

类似于蒙特卡洛法，速度较快，实现简单，支持实时绘制，真实性不强。



### 1

### 粒子派

将烟雾视为粒子的集合。

... ..

... ..

每个粒子具有其RGB颜色、Alpha值、位置、速度、加速度等一系列物理属性参数，这些参数会在每一轮迭代中按规律进行更新。

... ..

... ..

类似于蒙特卡洛法，速度较快，实现简单，支持实时绘制，真实性不强。

$$\{R, G, B, A\} \leftarrow \{R, G, B, A\} \\ + \{\Delta R, \Delta G, \Delta B, \Delta A\}$$

$$\text{or } \{GrayScale, Alpha\} \leftarrow \{GrayScale, Alpha\} \\ + \{\Delta GrayScale + \Delta Alpha\}$$

$$\{X, Y, Z\} \leftarrow \{X, Y, Z\} + \{\Delta X, \Delta Y, \Delta Z\} \\ = \{X, Y, Z\} + \{V_x, V_y, V_z\} \\ \{V_x, V_y, V_z\} \leftarrow \{V_x, V_y, V_z\} + \{\Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z\} \\ = \{V_x, V_y, V_z\} + \{a_x, a_y, a_z\} \\ \{a_x, a_y, a_z\} \leftarrow \{a_{force_x}, a_{force_y}, a_{force_z}\}$$



### 1

### 粒子派

将烟雾视为粒子的集合。

... ..

... ..

... ..

粒子只能由粒子源发出，发出时设定粒子的生命周期，生命按照迭代轮数进行计时。

粒子只能在其生命周期内存活，一旦生命周期结束，或物理属性更新到值域之外，粒子消亡。

类似于蒙特卡洛法，速度较快，实现简单，支持实时绘制，真实性不强。

发出：

$$\begin{aligned} Life &\leftarrow Life_0 \\ \{R, G, B, A\} &\leftarrow \{R_0, G_0, B_0, A_0\} \\ &\text{or } \{GrayScale, Alpha\} \leftarrow \{GS_0, A_0\} \\ \{X, Y, Z\} &\leftarrow \{X_0, Y_0, Z_0\} \\ \{V_x, V_y, V_z\} &\leftarrow \{V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}\} \\ \{a_x, a_y, a_z\} &\leftarrow \{a_{x0}, a_{y0}, a_{z0}\} \end{aligned}$$

迭代：

$$\begin{aligned} Life &\leftarrow Life - \Delta t \\ &\dots\dots \end{aligned}$$

消亡：

$$\begin{aligned} Life &\leq 0 \\ \text{or } \{R, G, B\} &\leq 0 \\ \text{or } GrayScale &\leq 0 \\ \text{or } Alpha &\leq 0 \end{aligned}, \text{ then Die}$$

## Part Two 两大流派

“真实的”烟雾

“流体的”烟雾

2

流体派

将烟雾视为流体，求解该流体的运动。

烟雾区域中的固、液、气的总和一起被视作一团不可压缩的流体。

...

...

...

符合物理规律，真实感较强，速度慢，几乎不可能实时精确绘制，实现复杂，需要对N-S方程进行很多化简

*Navier–Stokes Equations :*

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u + \mu \nabla^2 u + f$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)\rho + \kappa \nabla^2 \rho + S$$

速度场(*Vel*) — —  $u$

密度场(*Den*) — —  $\rho$

## 2

### 流体派

将烟雾视为流体，求解该流体的运动。

... ..

... ..

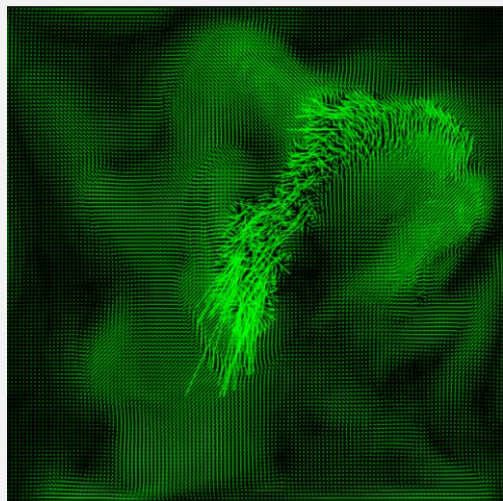
流体一般使用N-S方程进行精确描述，其中流体由速度场和浓度场进行描述。

... ..

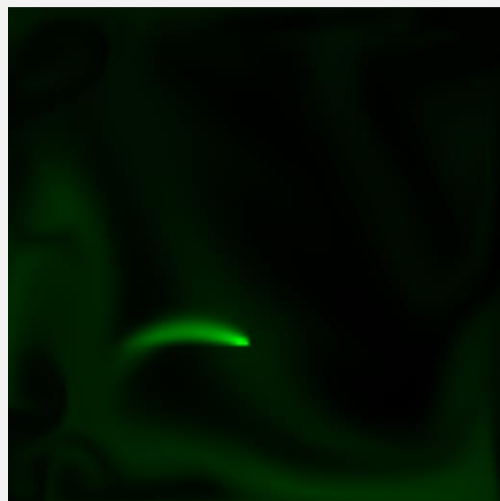
... ..

符合物理规律，真实感较强，速度慢，几乎不可能实时精确绘制，实现复杂，需要对N-S方程进行很多化简

## Part Two 两大流派



VEL



DEN

下一节进行详述

## 2

### 流体派

将烟雾视为流体，求解该流体的运动。

...

...

...

速度场描述了流体每个位置的速度矢量；速度场会在下一轮迭代中以迁移的方式直接引起浓度场的变化。

浓度场描述了流体每个位置的浓度；浓度场会在下一轮迭代中以扩散的方式直接引起浓度场的变化。

符合物理规律，真实感较强，速度慢，几乎不可能实时精确绘制，实现复杂，需要对N-S方程进行很多化简



# 实现方法

## 1

### 粒子方法

设置粒子各个参数初始化的范围

设置粒子各个参数的更新规则

迭代：

按照更新规则更新其余粒子

将满足消亡条件的粒子释放并删去

粒子源添加粒子并将其初始化

每一轮迭代绘制一帧，直接按照粒子参数中的形状、大小、颜色等绘制各个粒子

简单，易于实现，速度快

很难用简单的力学描述真实的烟雾的物理规律，不够真实

## 2

### 流体方法

将温度场、浓度场和速度场离散为格子

初始化速度场、浓度场、温度场等各个离散的场

设置烟源位置等各个参数

迭代：

添加外力

更新速度场

更新浓度场

更新温度场

每一轮迭代绘制一帧，按照浓度场中的数值绘制各个格子，相当于绘制了整个浓度场。

绘制了整个浓度场，更符合物理规律，更真实

计算复杂，需要使用大量的差分等计算，时间代价很大，不可实时绘制

## 1

### 粒子方法

设置粒子各个参数初始化的范围

设置粒子各个参数的更新规则

迭代：

按照更新规则更新其余粒子

将满足消亡条件的粒子释放并删去

粒子源添加粒子并将其初始化

每一轮迭代绘制一帧，直接按照粒子参数中的形状、大小、颜色等绘制各个粒子

简单，易于实现，速度快

很难用简单的力学描述真实的烟雾的物理规律，不够真实

更新

存活粒子

待消亡粒子

消亡

存活粒子

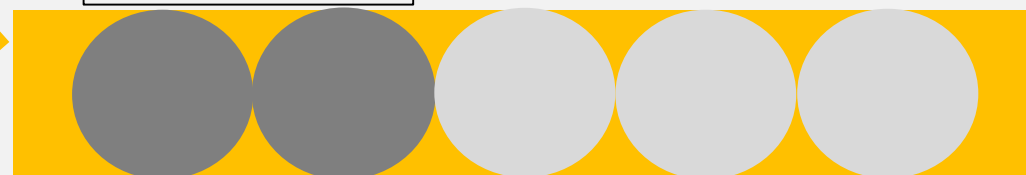
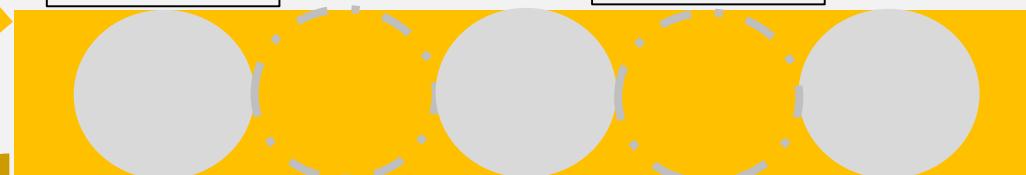
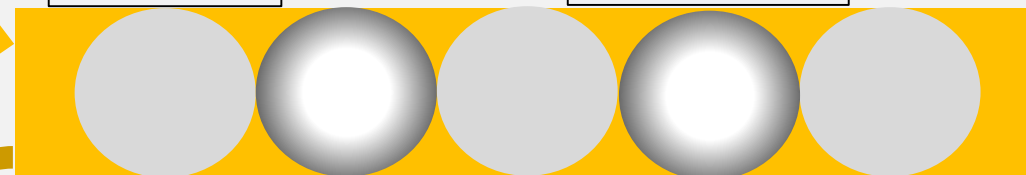
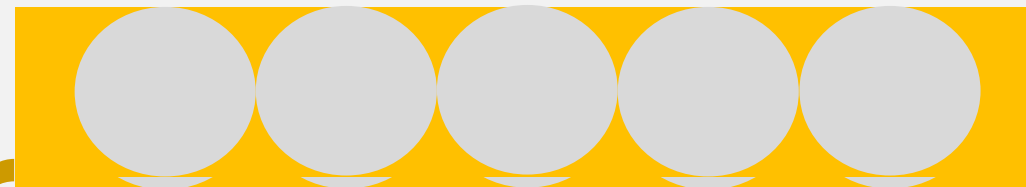
消亡粒子

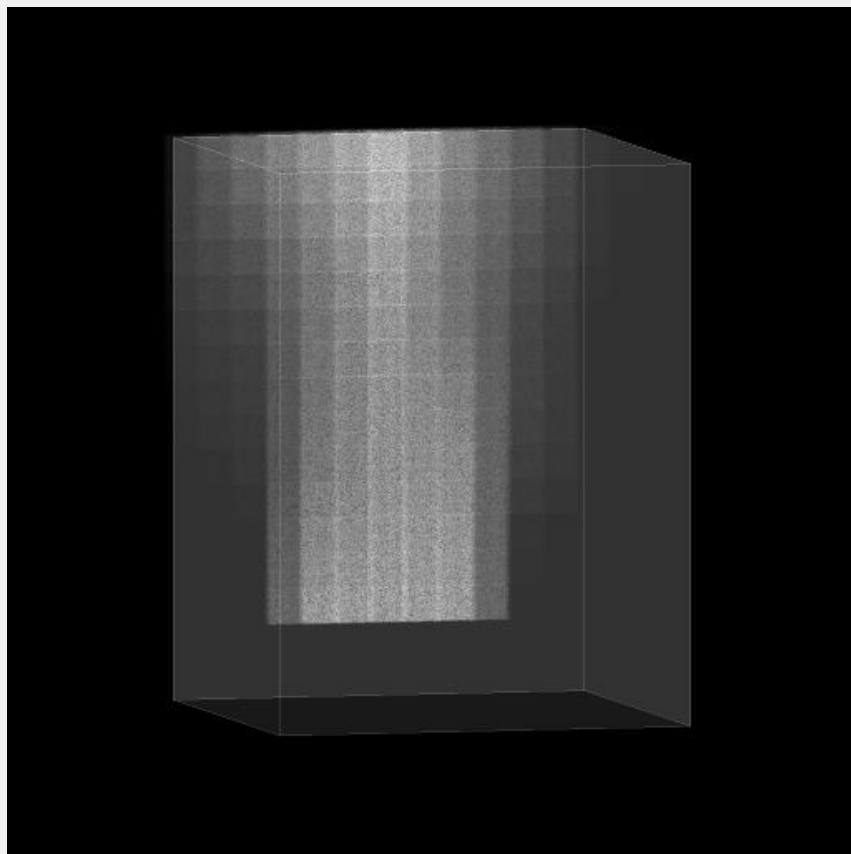
添加

新产生的粒子

粒子队列

{RGBA} or {GS, A},  
{X,Y,Z}, V, a,  
{Shape, Size}, ... ..





将浓度场离散化  
化微分为差分  
精细划分后可以满足连续的精度

## 2

### 流体方法

将温度场、浓度场和速度场离散为格子

...

...

...

绘制了整个浓度场，更符合物理规律，更真实

计算复杂，需要使用大量的差分等计算，时间代价很大，不可实时绘制



```
Vel = {0}  
Den = {0}  
Tem = {0}  
AddSource(...)
```

### 2

### 流体方法

...

...

初始化速度场、浓度场、温度场等各个离散的场

设置烟源位置等各个参数

...

...

绘制了整个浓度场，更符合物理规律，更真实

计算复杂，需要使用大量的差分等计算，时间代价很大，  
不可实时绘制

```
Vel = {0}  
Den = {0}  
Tem = {0}  
AddSource(...)
```

### 2

### 流体方法

...

...

初始化速度场、浓度场、温度场等各个离散的场

设置烟源位置等各个参数

...

...

绘制了整个浓度场，更符合物理规律，更真实

计算复杂，需要使用大量的差分等计算，时间代价很大，  
不可实时绘制

## Part Three 实现方法

### 添加外力

$$M \leftarrow M + \Delta t f(t)$$

### 传输

$$M \leftarrow M(p(-\Delta t))$$

### 扩散

$$(I - \mu \Delta t \nabla^2) M_{diff} = M$$

### 涡流

$$\begin{aligned} \nabla^2 q &= \nabla \cdot M \\ M &\leftarrow M - \nabla q \end{aligned}$$

速度场

2

## 流体方法

...

...

迭代：

更新速度场

更新浓度场

更新温度场

...

...

绘制了整个浓度场，更符合物理规律，更真实

计算复杂，需要使用大量的差分等计算，时间代价很大，不可实时绘制

## Part Three 实现方法

### 补充粒子

$$X \leftarrow X + \Delta t \cdot Source$$

### 扩散

$$\begin{aligned} X[IX(i, j, k)] = & X_0[IX(i, j, k)] + a \times (X_0[IX(i-1, j, m)] \\ & + X_0[IX(i+1, j, m)] + X_0[IX(i, j-1, m)] \\ & + X_0[IX(i, j+1, m)] + X_0[IX(i, j, m-1)] \\ & + X_0[IX(i, j, m+1)] - 6X_0[IX(i, j, k)]) \end{aligned}$$

### 传输

$$X \leftarrow X(p(-\Delta t))$$

浓度场

2

流体方法

...

...

迭代：

更新速度场

更新浓度场

更新温度场

...

...

绘制了整个浓度场，更符合物理规律，更真实

计算复杂，需要使用大量的差分等计算，时间代价很大，不可实时绘制

固定源头温度

扩散

传输

温度场

2

流体方法

...

...

迭代：

更新速度场

更新浓度场

更新温度场

...

...

绘制了整个浓度场，更符合物理规律，更真实

计算复杂，需要使用大量的差分等计算，时间代价很大，不可实时绘制

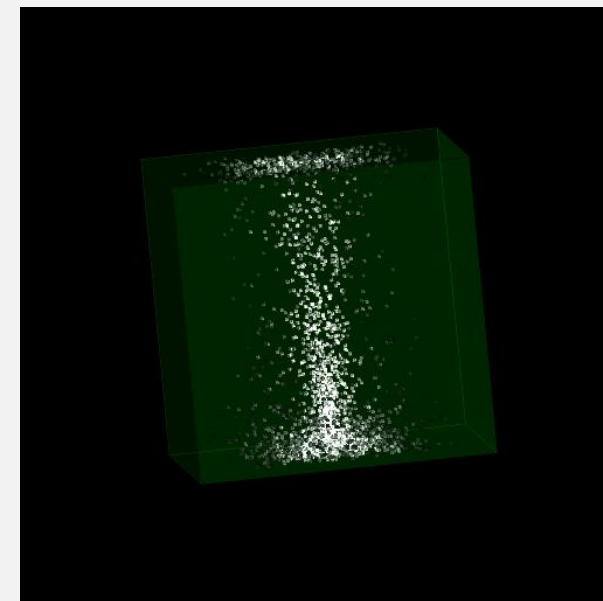
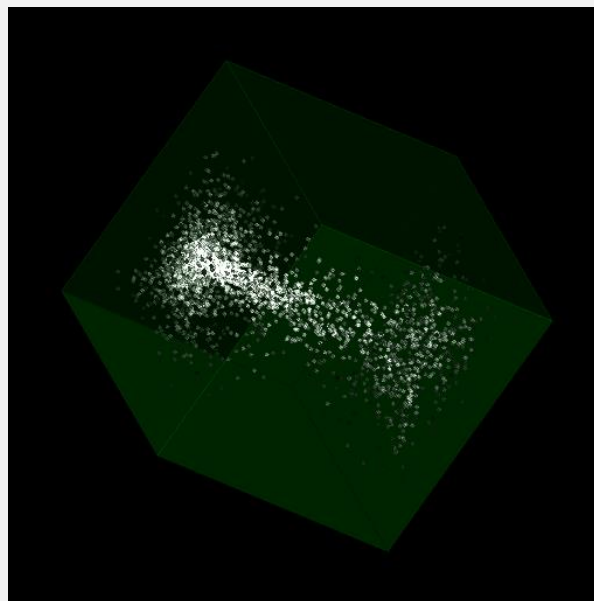
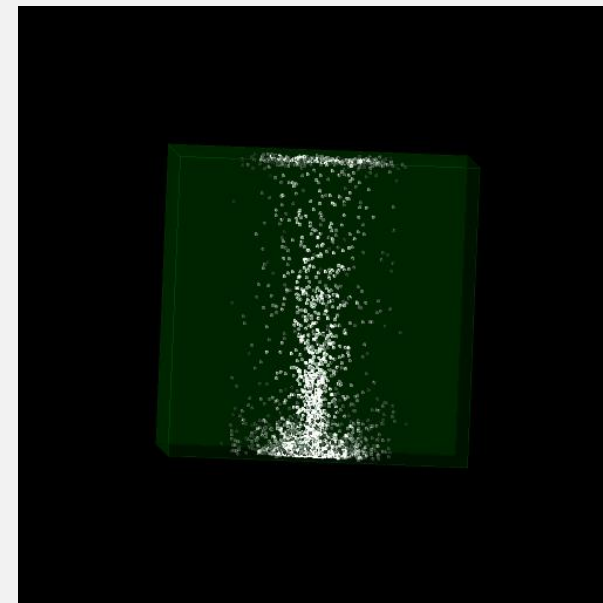
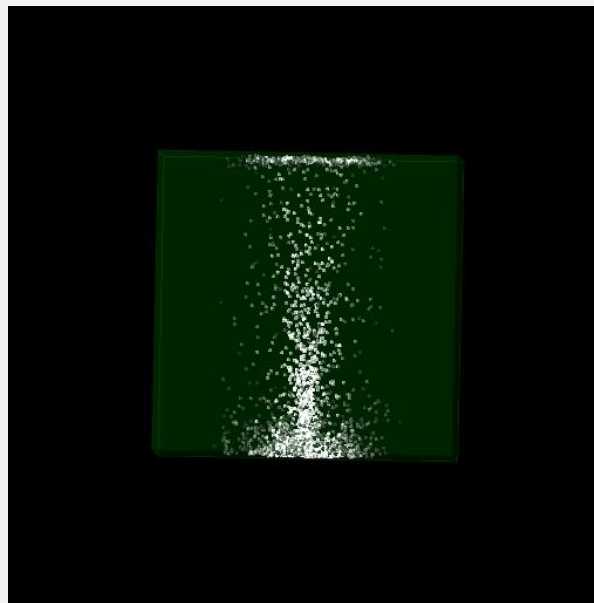
# 实验结果

# 4

## Part Four 实验结果

1

粒子方法



## Part Four 实验结果



2

流体方法





DEMO

2

流体方法



参考资料

Jos Stam. Real-Time Fluid Dynamics for Games.

Ronald Fedkiw, Jos Stam, Henrik Wann Jensen. Visual Simulation of Smoke.

Carlos Eduardo Scheideffer, Joao Luiz Dhl Comba, Rudnei Dias da Cunha. Navier-Stokers on Programmable Graphics Hardware using SMAC.



# THANKS FOR LISTENING

Team: 刘德欣 1500017704,  
张煌昭 1400017707  
From Yuan Pei College