

基于弱可压缩光滑粒子法的流体模拟研究与实践

(申请中山大学工学学士学位论文答辩报告)

学生：彭晨晗

peach_email@163.com



二〇二四年五月



选题背景

选题背景-模拟仿真

- 工业领域 (船舶, 气象, 飞行器)
- 娱乐 (影视, 电子游戏)

问题方向

- 解算器方法
- 多相流模拟-固液, 气液, 气固
- 速度应用-实时与离线



选题背景



图：影片《阿凡达》中的海岛环境



弱可压缩光滑流体动力学-WCSPH

- WC：弱可压缩-基于一个先验前提
- SPH：一种统计方法-利用周围采样某个点的某个值，对连续量的离散采样-通用公式如式 1
- 核函数-用于表示不同距离的粒子对于中心的贡献程度

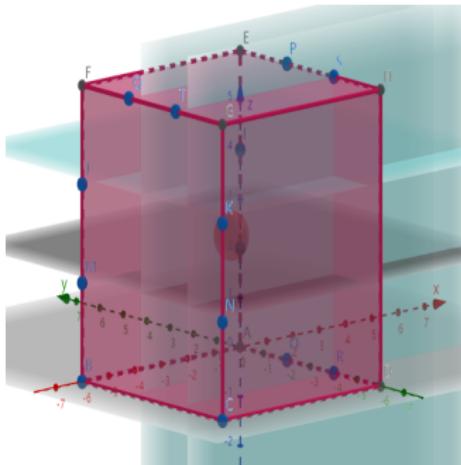
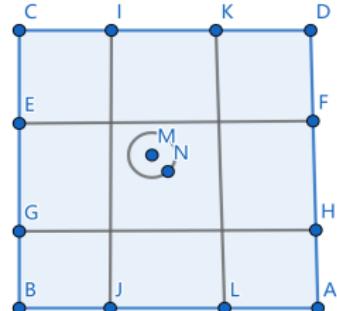
$$A_i = \sum_j A_j \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij} \quad (1)$$



解算器相关概念

领域搜索

- 目的：优化采样速度
- 切分粒子位置：空间换时间
- 领域以采样半径的常数倍为限制



渲染相关概念

渲染效果理论支撑

- beer 定理-厚度的影响
- 菲涅尔现象
- 渐进百分比滤波
- 光照-Phong 模型（环境光，漫反射，高光的结合，如式 2, 式 3, 式 4 所示）

$$\text{ambient} = \text{Strength} * \text{lightColor} \quad (2)$$

$$\text{diffuse} = \text{Strength} * \max(\text{norm} \cdot \text{lightDir}, 0.0) * \text{lightColor} \quad (3)$$

$$\text{specular} = \text{Strength} * \max(\text{viewDir} \cdot \text{reflectDir}, 0.0)^4 * \text{lightColor} \quad (4)$$



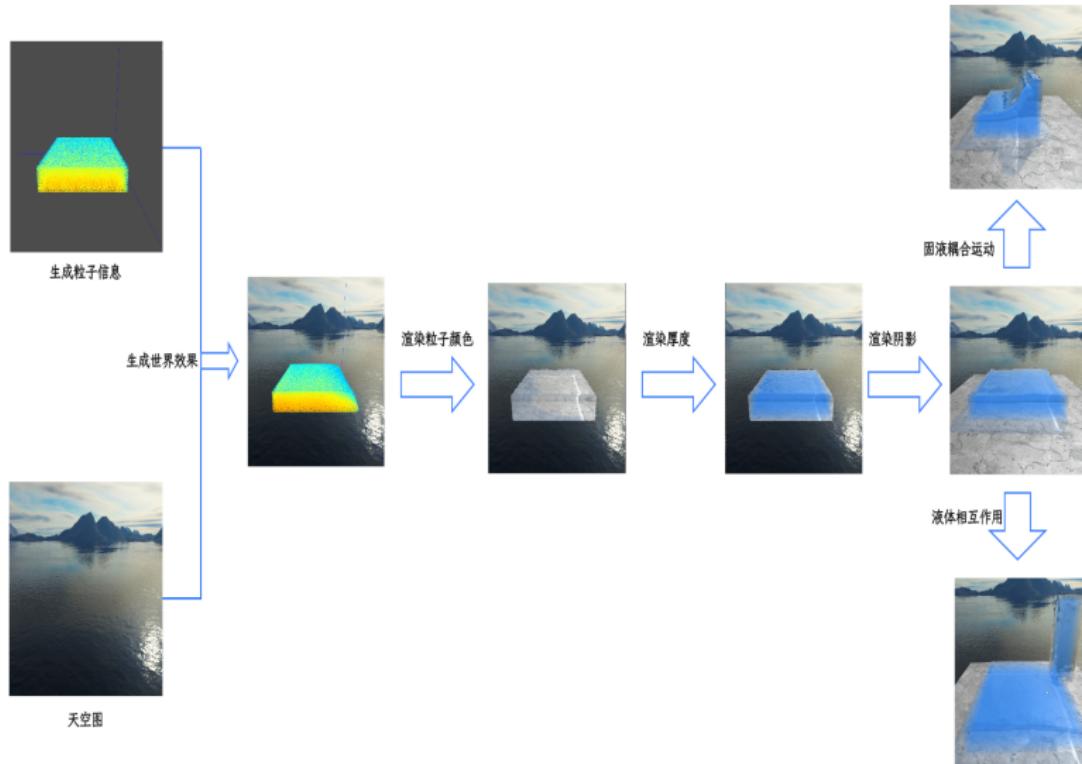
主要问题

主要困难

- 速度制约与大样本-粒子数，解算过程
- 渲染效果-拟真，准确，快速



总流程



解算器部分

解算流程

- 密度与压力采样
- 非压力场采样
- 压力场采样
- 边界和固液耦合处理
- 迭代更新



解算器部分

密度与压力采样

■ 密度采样:

$$\rho_i = \sum_j m_j W_{ij} \quad (5)$$

■ 压力采样:

$$p_i = k_1 \left(\left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^{k_2} - 1 \right) \quad (6)$$

压力场

■ 压力场采样:

$$\frac{1}{\rho_i} \nabla p_i = \sum_{j=0}^n m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla W_{ij} \quad (7)$$



解算器部分

非压力场

■ 粘滞力采样：

$$\eta \nabla^2 v_i = \eta \sum_j (v_i - v_j) \frac{m_j}{\rho_j} \nabla^2 W_{ij} \quad (8)$$

$$\nabla^2 v = 2(d+2) \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \frac{(v_{ij} * x_{ij})}{||x_{ij}||^2 + 0.01h^2} \nabla W_{ij}, \quad (9)$$



流程图

算法 3.1: WCSPH 的一次迭代

- 输入: 粒子集
- 1 对于所有 粒子 i 进行
 - 2 对于每个 粒子 j 在领域中 进行
 - 3 计算采样密度和采样压力: $\rho_i \leftarrow \sum_j m_j W_{ij}$
 - 4 $p_i \leftarrow k_1 \left(\left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^{k_2} - 1 \right)$
 - 5 对于所有 粒子 i 进行
 - 6 对于每个 粒子 j 在领域中 进行
 - 7 计算加速度: $a_i \leftarrow g - \frac{1}{\rho_i} \nabla p_i + \eta \nabla^2 v_i$
 - 8 依次迭代速度和位置: $v_{t+\Delta t} \leftarrow v_t + a_t \Delta t$
 - 9 $x_{t+\Delta t} \leftarrow x_t + v_t \Delta t$
 - 10 边界条件判断
 - 11 重新进行网格划分和邻域建立

图: 解算器流程图



渲染器部分

渲染流程

- 菲涅尔效应

$$FresnelSchlick = F_0 + (1.0 - F_0) * (1.0 - (h * \nu))^5 \quad (10)$$

- Phong 效应
- 厚度场-beer 效应
- 阴影效果



流程图

算法 3.2: 粒子渲染 shader

输入: 粒子集

1 对于所有 像素点 进行

2 计算所需要的向量(法向量, 视角向量, 光入射向量等)

3 计算菲涅尔效应结果:

4 $FresnelSchllic = F_0 + (1.0 - F_0) * (1.0 - (h * \nu))^5;$

5 计算折射光线:

6 $refractColor \leftarrow Raytracer(Phong\&Shadow)$

7 计算厚度影响:

8 $transparentFactor \leftarrow beer()$

9 混合厚度和折射光的作用

10 $refractColor = transparentFactor * refractColor +$
 $(1.0 - transparentFactor) * fluidColor;$

11 计算反射光线:

12 $reflectColor \leftarrow Raytracer(Phong\&Shadow)$

13 混合三种光线的效果:

14 $outColor = mix(refractColor, reflectColor, FresnelSchllic);$

图: 解算器流程图



实验环境

表：实验硬件设备环境

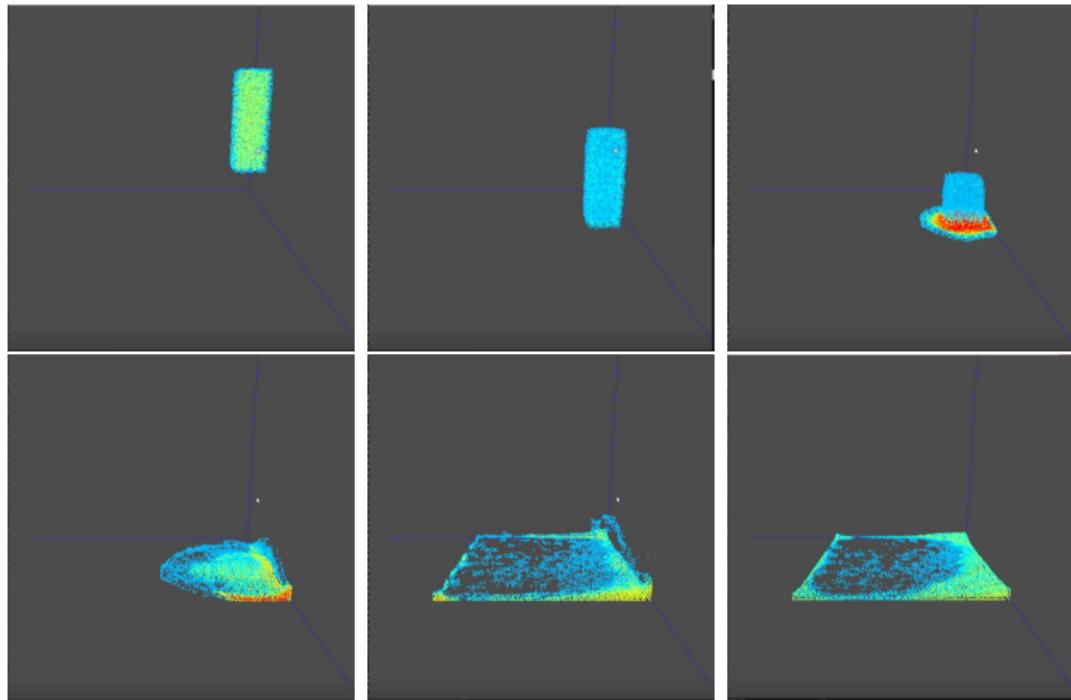
处理器	Intel(R) Core(TM) i5-12600KF CPU @3.70 GHz
显卡	NVIDIA GeForce RTX 3070
内存	32GB
显存	24GB
硬盘	WD Blue SN570 1TB SSD
分辨率	2440 x 1080

表：实验软件设备环境

操作系统	Windows 10 专业版 64bit
集成开发环境	Visual Studio 2022
编程语言	C++ 11
着色语言	OpenGL Shading Language 4.5 (GLSL)
图形渲染 API	可编程渲染管线 OpenGL 4.5.0 core

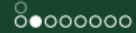


实验结果

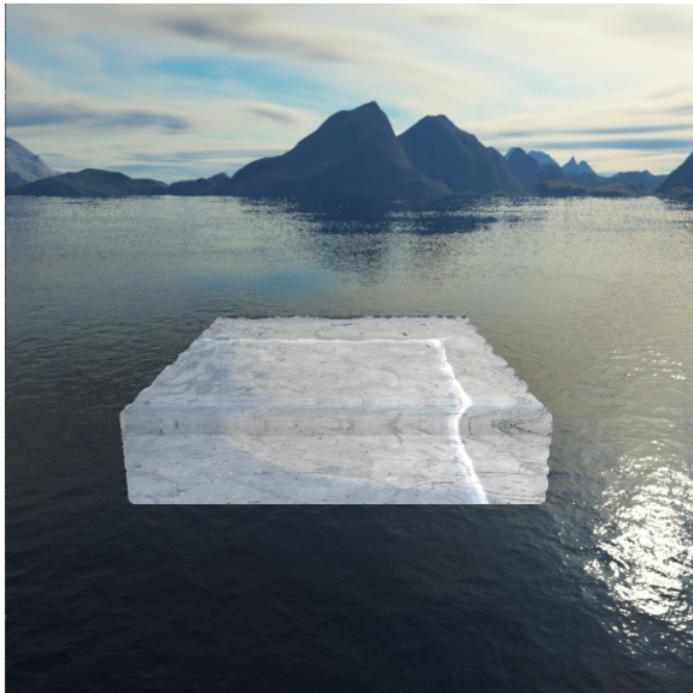


图：液柱粒子图运动过程示意图





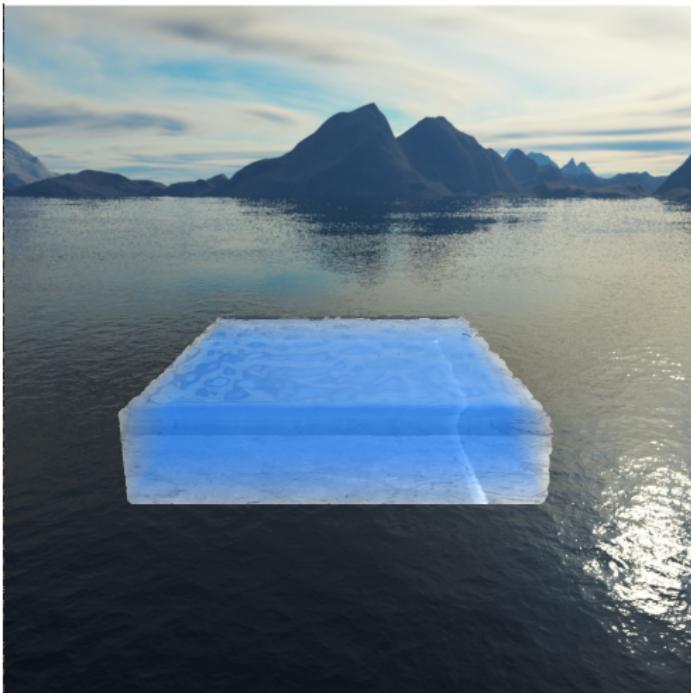
实验结果



图：光照渲染下的水结果



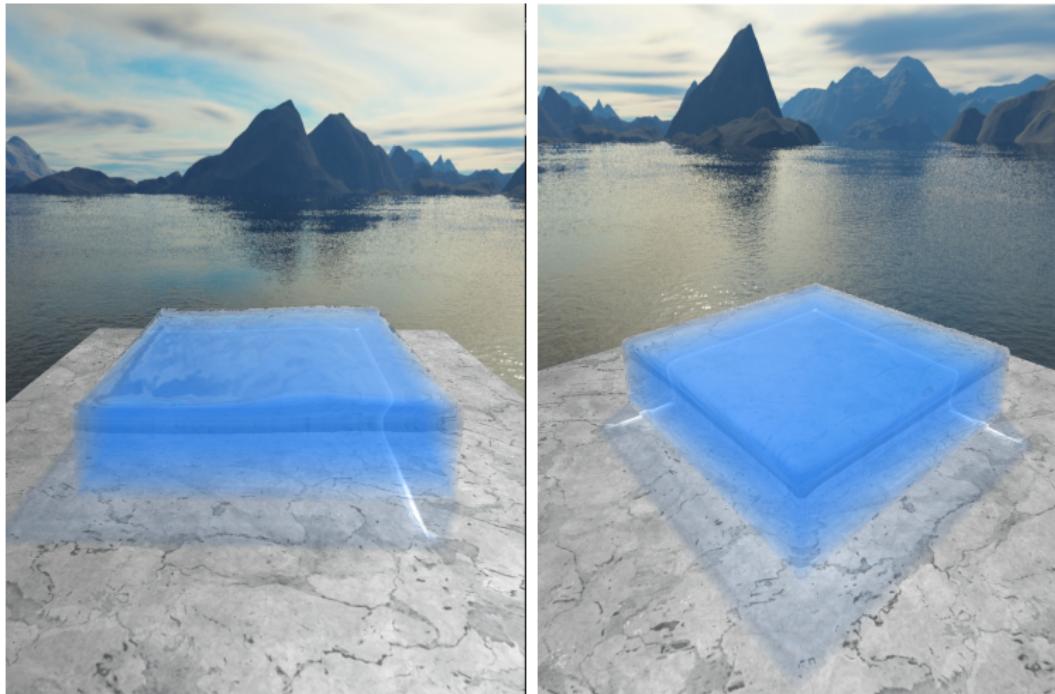
实验结果



图：厚度图



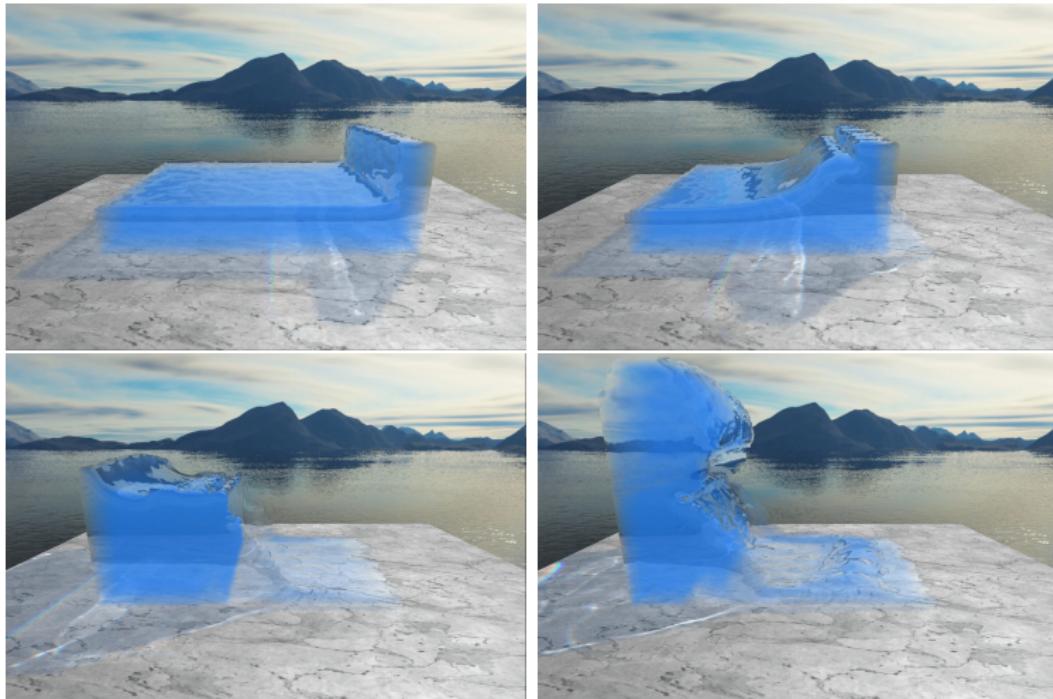
实验结果



图：不同角度阴影图展示

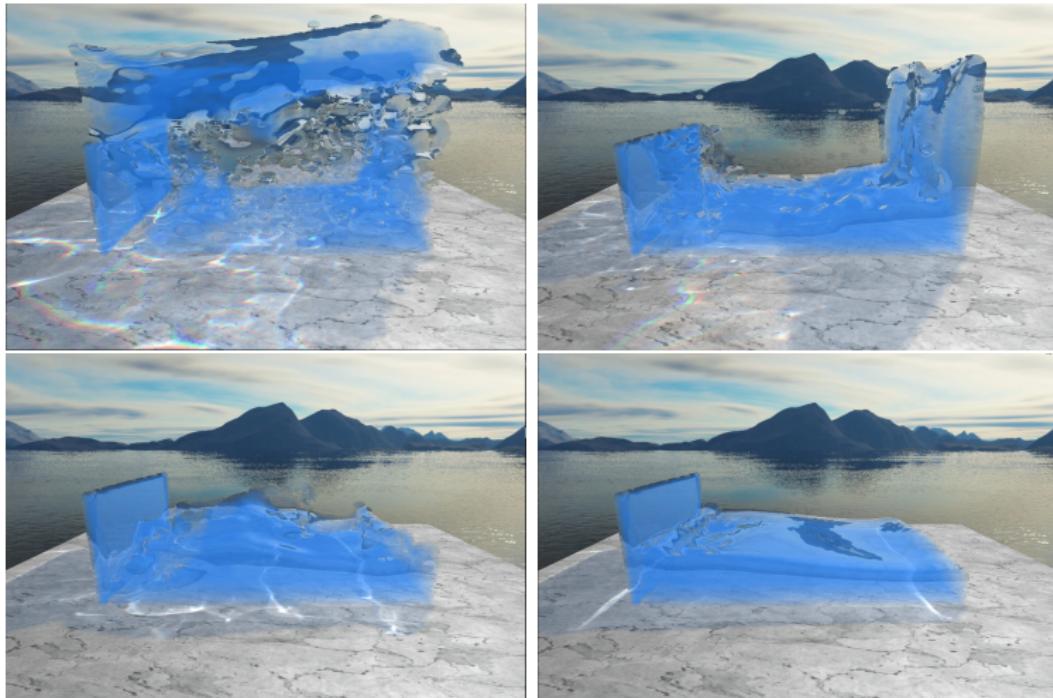


实验结果



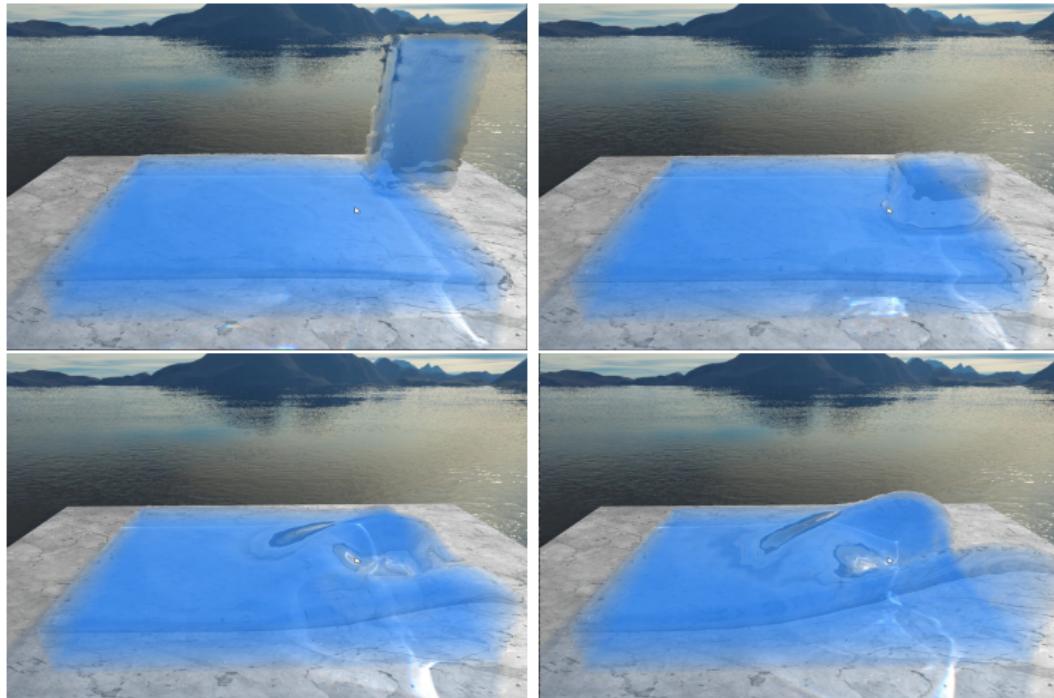
图：固液耦合运动过程示意图 1

实验结果



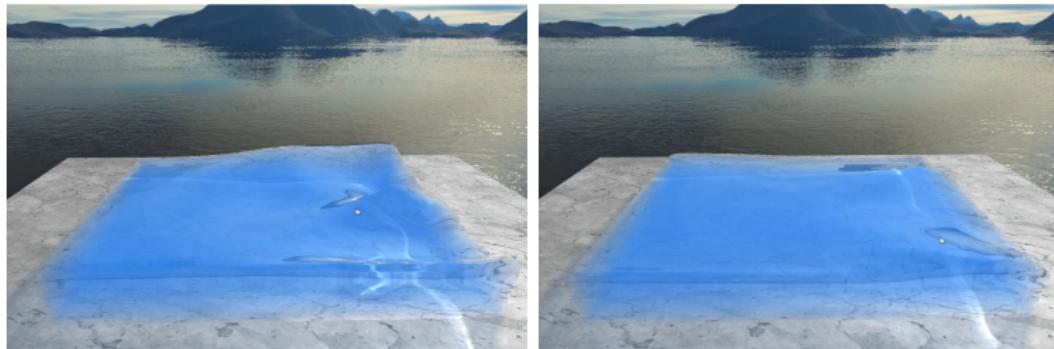
图：固液耦合运动过程示意图 2

实验结果



图：液体作用运动过程示意图

实验结果



图：液体作用运动过程示意图



其他块语法示例

工作总结

- 1 模拟非光滑平面生成粒子
- 2 实现关于流体模拟的解算器
- 3 根据解算器返回的粒子信息渲染粒子
- 4 根据环境的相关算法设计渲染器

展望

- 1 更好的解算器
- 2 更优异的多相流处理方法
- 3 优化速度和粒子规模



Questions?

Thank you!

