1. 绪论
   1. 课题研究目的和意义

随着科学技术的迅猛发展，科学计算在各行各业中起到的作用越来越重要，其所涉及到的对象越来越多，问题越来越复杂，计算规模也越来越大；而这时从海量的计算数据中挖掘有效的、具有指导意义的信息就变得越来越困难，于是也变得更加重要，其中可视化后处理【1】是一个非常关键的领域。

近年来，无网格法【2】发展迅速，但是由于其相对于广泛使用的有限元法等一系列科学计算方法而言，其发展时间相对较短，在很多方面的发展还不够完善，尤其是专门针对无网格法可视化后处理方面的研究工作。

有限元法主要处理小变形的固体力学问题，且由于基于网格，于是在有限元法的可视化后处理中【3】，主要显示模型的网格和表面信息、位移信息、应力等值线（面）等。有限体积法等计算流体力学（CFD）方法，主要基于欧拉网格计算，其可视化后处理【4】主要针对标量场的等值线（面）显示，矢量场的点图标、矢量线（面）显示等功能实现。针对这一类的仿真计算方法，市面上已经有不少商业后处理软件，如Tecplot；很多商业计算软件如Abaqus，Ansys，FLUENT等也都带有后处理模块。

然而，无网格法的可视化和以上的几类方法的情况有所不同。首先，无网格法多数是基于粒子表示的数据，比较典型的代表是光滑质点流体动力学法（SPH）【5】和物质点法（MPM）【6】，于是传统后处理中常用的等值线（面）显示等在网格和表面上处理的方式便不方便被无网格法使用。虽然有如Delaunay三角化【7】等由粒子生成非结构网格的算法可以将传统方法使用在无网格法数据上，但是鉴于无网格法本身的特点，仍有大量的情况不适合使用该方法。其一，无网格法经常被用来模拟冲击、爆炸等大变形物理过程，经常伴随有大量高度飞溅的粒子，如爆炸烟雾、侵彻后的碎片云等，这些物质并不适合构造网格或表面。其二，无网格法经常用来模拟液固耦合、相变、化学反应等多种不同状态物质的混合物理过程，使用传统的等值线（面）等表示方法并对不同状态物质以颜色区分这种形式，很多场合下也并不能够使人对仿真结果有一个直观的认识。于是，现在大多数情况下人们还是采取了直接在原始粒子数据上表示计算结果的方式，如使用Paraview等商业软件。如图【1-1】所示，

左为导弹侵彻混凝土墙的照片效果，右为使用MPM仿真的此类问题并用Paraview直接显示粒子信息。右图的效果很大程度上让人无法接受，如果实现左图的真实效果，会好很多。

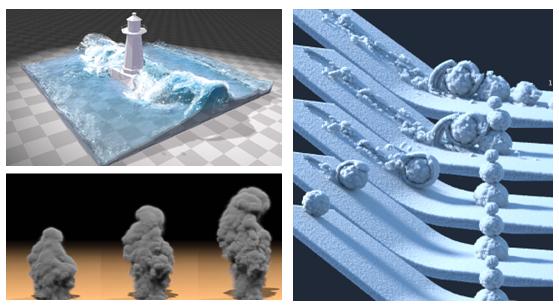
由此可见，对该类问题的可视化，采用真实感渲染的后处理方式是最能够直观、有效地表现物理过程的方法之一，而且其另一个优点是方便和实现效果对比。

清华大学航天航空学院计算动力学研究室开发的MPM仿真计算软件PeneBlast就是使用Paraview进行后处理的，其效果不能令人满意，于是这促成了本课题，我通过本课题的研究，开发了一套基于真实感渲染的无网格法可视化后处理系统，并将其加入到了PeneBlast中。

* 1. 基于物理仿真的真实感图形渲染工作介绍

虽然专门针对无网格法的通用真实感渲染系统非常少见，但是在图形学界，针对某一类具体自然现象而使用合适的仿真计算方法实现的真实感图形渲染工作还是比较多的，其中包括近些年非常火爆的基于SPH的流体仿真，基于各类CFD算法的烟雾、火焰和云的仿真，以及其它一些使用仿真计算生成的真实感效果，比较典型的是迪斯尼于2013年提出的使用物质点法模拟的雪的效果【8】

图【1-1】



其中由于流体和烟雾的渲染效果和无网格法主要适用物体最为相关，所以这里着重介绍这两方面的工作。

* + 1. 基于粒子的液体效果仿真

由于自然界中的液体效果大多是自由表面的，所以相比于有限体积法等一般CDF算法，SPH法在处理这类问题时有其独特的优势。也正因为如此，使用SPH法仿真和渲染时也需要关注如下几个方面的问题：邻近粒子搜索、粒子表示的表面追踪、特殊细节（如泡沫、水花以及空气泡等）的渲染。

1.邻近粒子搜索

SPH在计算过程中以及随后的渲染过程中都需要用到邻近粒子搜索，而为了防止蛮力搜索方式极度耗费时间的缺点，一般都会引入各种方便构造和查找的空间结构来加速搜索。比较普遍采用的结构有k-d树、八叉树等层次结构【9-11】和空间规则网格这两类。K-d树等层次结构的优点是其不受空间范围的限制，而其数据的组织时间复杂度为，查找复杂度为，相比于空间规则网格的和复杂度，在粒子数非常庞大时，其效率上的不足就会比较明显，且由于大多数仿真的流体都不会过于分散，空间范围的因素可以不必过多考虑，所以空间规则网格的方法被更多地采用。

规则网格结构通常是将空间划分为规则的立方体单元，然后使每个粒子都和一个单元对应，搜索邻近粒子时只需要直接查找目标位置及其附近的若干单元中的粒子。但是，该方法在并行化过程中，虽然查找过程比较方便实现，但是在构造网格的过程中可能会出现写冲突的情况，于是为了克服此问题，人们提出了索引排序【12】及Z索引排序【13】等算法。另一种高效的算法是空间哈希算法【14】，该算法通过将空间点坐标通过特定的散列函数映射到一个预先设定好长度的哈希表中以实现线性的插入及查找工作。一个比较普遍的散列函数如下：



其中m为哈希表长度，，，为三个大质数，【14】中取73856093, 19349663和83492791

* 1. 真实感渲染算法介绍
  2. 本文工作

【1】Nielson G M, Shriver B. Visualization in scientific computing[M]. IEEE Computer Society Press, 1990.

[3]范彦斌,杨彭基. 有限元分析计算结果的计算机图形可视化显示[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,1995,01:11-16.

[4]雷勇,魏涛,柳共青. CFD可视化研究与进展[J]. 航空计算技术,1999,01:8-11+19.

【5】Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars[J]. Monthly notices of the royal astronomical society, 1977, 181(3): 375-389.

【6】Sulsky D, Chen Z, Schreyer H L. A particle method for history-dependent materials[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1994, 118(1): 179-196.

[7] Watson DF. Computing the n-dimensional Delaunay tessellations with application to Voronoi polytopes[J].

The Computer J., 1981, 24(2):167-172.

【8】Stomakhin A, Schroeder C, Chai L, et al. A material point method for snow simulation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013, 32(4): 102.

【9】KEISER R., ADAMS B., DUTRÉ P., GUIBAS L.,

PAULY M.: Multiresolution Particle-Based Fluids. Tech. rep.,

ETH Zurich, 2006.

【10】KEISER R.: Meshless Lagrangian Methods for Physics-

Based Animation of Solids and Fluids. PhD thesis, ETH Zürich,

2006.

【11】ADAMS B., PAULY M., KEISER R., GUIBAS L.:

Adaptively sampled particle fluids. In ACM Transactions on

Graphics (Proceedings SIGGRAPH) (2007), vol. 26, pp. 48:1–

48:7.

【12】PURCELL T. J., DONNER C., CAMMARANO M.,

JENSEN H. W., HANRAHAN P.: Photon mapping on programmable

graphics hardware. In Proceedings of the ACM SIGGRAPH/

EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware

(2003), pp. 41–50.

【13】GOSWAMI P., SCHLEGEL P., SOLENTHALER B., PAJAROLA

R.: Interactive SPH simulation and rendering on the

GPU. In Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics

Symposium on Computer Animation (2010), pp. 55–64.

【14】TESCHNER M., HEIDELBERGER B., MÜLLER M.,

POMERANETS D., GROSS M.: Optimized spatial hashing for

collision detection of deformable objects. In Proceedings of Vision,

Modeling, Visualization (VMV) (2003), pp. 47–54.