

基于物理的海浪模拟综述

段兴锋^{1,2} 任鸿翔¹

(大连海事大学航海动态仿真和控制交通行业重点实验室 大连 116026)¹

(集美大学航海学院 厦门 361021)²

摘要 真实感流体的模拟是计算机图形学领域中研究的热点和难点之一,海浪模拟是流体模拟动画的重要组成部分,其真实感、实时性和交互性等直接影响到海面场景逼真的程度。重点回顾了基于物理的海浪模拟研究方法的发展,并对近年来海浪模拟的热点问题如波浪的翻卷和破碎、浪花的飞溅和泡沫、流固耦合、两相流和多相流的模拟进行了详细的分析,最后针对有限的系统资源与随着规模增长的计算资源之间的矛盾,重点讨论了加速策略。未来将结合多种模拟方法的优点,对海浪建模进行合理的简化,改善数据结构,并在此基础上实现 GPU 并行化,以满足实时仿真的要求,这将是基于物理的海浪模拟的发展方向。

关键词 海浪模拟,纳维-斯托克斯方程,流固耦合,多相流

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.08.001

Overview of Physically-based Ocean Waves Simulation

DUAN Xing-feng^{1,2} REN Hong-xiang¹

(Key Laboratory of Marine Dynamic Simulation & Control for Ministry of Communications, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)¹

(College of Navigation, Jimei University, Xiamen 361021, China)²

Abstract Realistic fluid simulation is one of the hotspots and difficulties in computer graphics. Ocean waves simulation is an important part of the fluid simulation in computer animation, and reality, real time and interaction are the key of the simulation of the ocean wave scene. This paper presented a survey of the development of physically based ocean waves simulation, introduced the hotspots of ocean wave simulation such as advection, overturning, breaking waves, splash, foam, fluid-solid interaction, multi-phase fluid in detail and focused on the acceleration technology because the system resources could not meet the demands of modeling computing. Future research is using various methods to optimize reasonably the wave modeling and improve the data structure, and implement on GPU using CUDA in order to meet the demand of real time wave simulation.

Keywords Ocean waves simulation, Navier-Stokes equation, Fluid-solid interaction, Multi-phase fluid

真实感流体的模拟是计算机图形学领域中研究的热点和难点之一,流体模拟动画主要涉及烟雾、云彩、火焰、海浪以及爆炸等,这些现象也是计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)研究的热点问题。不同于流体动画模拟,CFD强调对问题的精确求解。而流体动画通过基于物理的模拟体现真实感,为了满足视觉效果,其更侧重于图形的快速显示,而无需获取问题的精确解。因此,计算机图形学的研究者们试图从CFD中汲取营养,将计算模型进行改进,以实现真实感流体模拟,研究的重点侧重于流体的建模。海浪模拟是流体模拟动画的重要组成部分,其真实感、快速性和交互性等直接影响到海面场景逼真的程度。海面场景是虚拟海战场、航海模拟、海难救助、飞行模拟、三维游戏、影视特技等众多虚拟现实应用领域的重要组成部分。早期,由于受计算机硬件的限制,基于物理的海浪模拟不能满足实时性的要求。近年来,计算机硬件尤其是图形处理器(Graphics Processing

Unit, GPU)得到了迅速发展,基于物理的海浪模拟成为了研究的热点。本文主要探讨基于物理的海浪模拟动画,涉及海浪建模、研究的热点、加速策略等问题。

1 海浪模拟研究方法的发展

近30年来,国内外学者对海浪的建模做了很多相关的研究,所用的方法主要分为两大类:基于构造的方法和基于物理模型的方法。

1.1 基于构造的方法

基于构造的方法主要是用数学函数构造出海浪的外形。该方法又可分为两类:一类是基于几何模型的方法;另一类是基于统计和谱的方法。

1.1.1 基于几何模型的方法

基于几何构造的方法主要是用数学函数构造出海浪的外形,如采用次摆线、正弦函数、Beta-样条曲线等模拟波浪的几

到稿日期:2013-10-08 返修日期:2013-12-15 本文受国家973计划项目(2009CB320805),辽宁省自然科学基金(201202018)资助。

段兴锋(1979-),男,博士生,讲师,主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实、交通运输工程, E-mail: dxf-yk@163.com;任鸿翔(1974-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实。

何形状。也有通过 Perlin 噪声的叠加来构建海面高度场^[1,2], 可以对几组噪声进行叠加来生成连续平滑海面,但不能对波的传播方向和速度进行很好的描述。基于几何模拟的方法比较简单,波形容易控制;但其构造出的波形过于规则,人为痕迹明显,真实感较差,已经不能满足当前的应用需求。

1.1.2 基于统计和谱的方法

基于统计和谱分析的方法是当前比较成熟的方法,广泛应用于虚拟现实中海面场景的绘制。该方法以微小振幅波理论和有限振幅波理论为基础,把实际的海洋波动看作是由许多振幅不同、周期不同、相位杂乱的简单波动的叠加,利用波浪谱和方向谱对波浪模型参数进行设定,一般用快速傅里叶变换(FFT)对简单波动进行叠加。波浪谱一般采用 Phillips 波浪谱^[3]或 P-M 谱和方向谱^[4]或文氏方向谱^[5]等。Frechot^[6]进一步分析了波浪谱、能量及海浪高度三者的关系,提出了一种谱采样的优化方法,并依据天气情况绘制海浪。波浪模型一般采用 Gerstner-Rankine 模型^[7]或不规则长峰波模型^[8]等。黄玲等^[9]在三维 Gerstner 海浪模型的基础上,采用基于物理的 NURBS 卷浪曲面生成 3D 卷浪曲面库,用以取代海面波峰,实现了不同情况下的大规模卷浪的效果,但真实感不足。

1.2 基于物理的方法

基于物理模型的方法主要以 Navier-Stokes(N-S)方程为基础,可分为两类^[10]:一类是欧拉法,即一种基于网格的方法;另一类是拉格朗日法,即一种基于粒子的方法。基于物理模型的方法更适合用于流体倾倒、泡沫、飞溅、喷泉等小范围精细尺度或特定场景的模拟。

1.2.1 欧拉法

欧拉法是一种基于网格的方法,其网格固定在模拟对象所处的空间上,模拟对象在固定网格单元上运动,整个计算过程中网格单元的形状和体积都保持不变,在每个网格节点上计算流进此位置的流体的速度、压力、密度等参数随时间的变化规律。如引入二维浅水线性方程求解高度场,采用二维 N-S 方程求解表面速度场,利用 MAC(Marker and Cells)求解流体等。

1.2.2 拉格朗日法

基于粒子的拉格朗日方法能够适用于各种规模场景的流体模拟,并能实现卷浪等逼真效果,因此正越来越受到流体模拟研究者的关注。目前,用拉格朗日法模拟流体主要有 MPS(Moving Particle Semi-implicit)、LBM(Lattice Boltzmann Model)和 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)等方法。

MPS 是一种模拟不可压流体的拉格朗日粒子法,由 S. Koshizuka 和 Y. Oka 于 1996 年提出,它最初用于求解核能领域的热力学难题,如两相流、蒸汽爆炸、存在大变形的流固耦合等,而这些问题用传统的网格方法如 FDM 或 FEM 进行模拟存在网格大变形的困难。MPS 方法用相互作用的粒子来表征流体,每个粒子包含位置、质量、动量及能量等属性值,与其周围粒子通过核函数相互作用,并结合控制方程来计算流体粒子在流动时的属性值变化,从而追踪整个流体的流动过程。Premoze 等^[11]将 MPS 方法引入流体的模拟,通过求解泊松方程隐式求解压力来保证流体的不可压缩性即体积守恒,但其求解压力泊松方程非常耗时,因而效率较低。Becker 等^[12]通过引入 Tait 方程来替换状态方程,避免了对泊松方程

的求解,得到近似体积守恒的效果,但当时间步长稍大时,该方法易出现不稳定的现象。

LBM 也是一种拉格朗日的方法,其主要思想是基于大量时空离散的微观粒子之间的碰撞迁移并利用这些微观粒子运动的统计平均结果来反映流体现象的宏观特征。不同于其他方法,该方法描述了粒子分布函数的演变,而不是追踪每一个实际粒子,具有物理图像清晰、边界条件容易处理、并行性能好等优点。Wei 等^[13]将 LBM 方法引入流体图形仿真,并模拟了火焰,随后他们还模拟了空气中的烟气。Thürey 等^[14]结合 LBM 自由表面方法和 Level Set 方法来计算水体表面曲面和模拟较薄的水体,但由于涉及预测流体速度和保证质量守恒,因此难以实时绘制。朱红斌等^[15]引入一种二元 LBM 并采用 GPU 并行化计算,实现了两种液体组成的混合流的模拟,来表现不同粘性的液体间的扩散(互溶)和分离现象。王长波等^[16]利用 LBM 和浅水方程并结合 Marching Cubes 和自由表面算法来抽取流体表面,实现了不同自由表面流体的绘制,如溪流、水池浅水流、洪水水淹等。Enright 等^[17]进一步提出 Particle Level Set 方法,为水的自由表面增加了更多的细节,大大改善了自由表面模拟的真实感,然而其表面重构花费了较多的计算资源。

SPH 是一种无网格的拉格朗日粒子法,最初用于解决三维开放空间的天体物理学问题,目前被广泛应用于流体动力学、固体力学及其他工程学科各种问题的数值仿真中。其核心是一种插值,引入光滑核函数表示粒子的影响域,通过影响域的积分插值计算粒子的密度、压力、粘性力,从而得到位置、速度和加速度等场变量,其难点在于流体表面的抽取。不同于 MPS 方法,SPH 方法不需要求解泊松方程,减少了计算量;光滑核函数不仅起到权函数的作用,而且其梯度直接参与函数梯度的计算。在拉格朗日方法中,SPH 方法由于更加真实、稳定且高效,目前已成为最有前景的模拟方法之一。Stam 等^[18]最早将 SPH 方法引入流体模拟,即模拟气体和火焰的效果;Takeshita 等^[19]利用 SPH 模拟了爆炸效果;Müller 等^[20]首次将 SPH 方法应用于水面的绘制。Thürey 等^[21]提出了一种结合高度场和 SPH 模型的方法来实时模拟卷浪和水花的算法,但其水面的效果会出现明显的不连续。Losasso 等^[22]提出了基于网格的 Particle Level Set 结合 SPH 的方法,其在保证稳定性的前提下,能较好地模拟出浪花飞溅和泡沫等效果;但由于其运算较为复杂,实现效率较低,且所采用的 FLIP(Fluid Implicit Particle)方法存在计算速度场更新的固有问题,经常导致得到的速度变化范围很大,从而增大数值耗散,产生不希望得到的噪声。

2 海浪模拟研究的热点问题

近年来,海浪模拟的热点问题主要是波浪的翻卷和破碎、浪花的飞溅和泡沫、流固耦合或流固交互、两相流和多相流的模拟。

2.1 波浪的翻卷和破碎

Mihalef 等^[23]指出,海浪共有 3 个尺度的绘制效果:精细尺度为飞溅和泡沫,中间尺度为水面的波纹,大尺度为波浪的翻转和破碎。早期的研究大多采用基于构造的方法针对水面波纹的生成进行模拟,也结合粒子系统对泡沫和白浪等的特殊效果进行了模拟,但真实感有待提高,而且很难模拟波浪的

翻卷和破碎,尤其是狂风巨浪等效果。基于 Level Set 的欧拉方法能较有效地描述卷浪的自由表面,但是对于细浪和泡沫等细节尚不能很好地模拟。Thürey 等^[24]提出自适应的分层粗细网格;Irving 等^[25]混合高度场和 MAC 网格;Thürey 等^[26]结合二维浅水方程和三维格子气自动机模型;Tan 等^[27]利用几个相互嵌套的多层网格来模拟大尺度水体,以有效地减少不必要的计算。最近,武小龙等^[28]提出了将三维 N-S 方程与二维波函数相结合。Chentanez 等^[29]引入包括柱状格子的多重网格来降低流体模拟的计算量。但完全基于网格的方法通常无法模拟低于网格尺度的细节,随着模拟区域的扩大,会大大影响细节的追踪。

基于粒子的拉格朗日方法,从分析流体各个微粒的运动出发得出整个流体的运动状态,能够很好地模拟复杂的水面细节。Wang 等^[30]采用 MPS 方法实现了大规模海浪破碎、泼洒的效果。Onderik 等^[31]采用 SPH 方法实现了波浪的翻卷、破碎浪及浪花飞溅、泼洒和泡沫效果。Becker 等^[12]针对不可压缩流体,基于 WCSPH(Weakly compressible SPH),实现了破碎浪和浪花飞溅的效果,但当时时间步长稍大时,该方法易出现系统不稳定的现象。Sonthaler 等^[32]针对流体的不可压缩性,采用 PCISPH(Predictive-corrective incompressible SPH)对波浪的翻卷、破碎浪及浪花飞溅进行模拟。延河等^[33]基于 SPH 的方法,提出自适应的表面张力模型,该模型能够模拟浪花的飞溅和泡沫效果,并采用 GPU 技术提高了整个过程的计算效率,实现了海浪行进、翻卷、破碎及拍岸等真实感较强的动态效果。神和龙等^[34]采用 SPH 方法对破碎浪的建模进行了尝试。Ihmsen 等^[35]利用 Diffuse Material 对流体粒子进行统一,实现了波浪的翻卷、水花飞溅、泡沫和气泡等效果,见图 1。

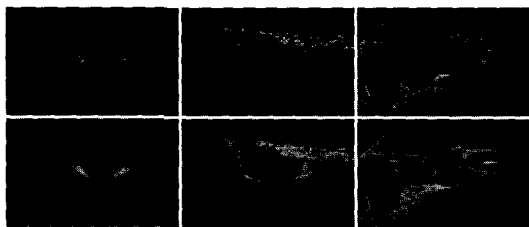


图 1 Ihmsen 等实现的波浪翻卷、浪花飞溅、泡沫和气泡的效果

另外,也有结合欧拉法和拉格朗日法两种方法的优点进行波浪的翻卷、破碎的模拟,如 Chentanez 和 Thürey 等^[21]结合浅水方程和粒子来模拟海浪、波浪的翻卷、破碎浪等效果,但这需要耗费较多的计算时间,实时性不佳。Losasso 等^[22]提出的基于网格的水平粒子集结合 SPH 方法较好地模拟了浪花飞溅和泡沫等效果,但该算法计算代价太大,效率也不高。

2.2 流固耦合

在计算机图形学领域中,流-固耦合或流固交互问题主要研究刚体、可变形物体以及轻薄物体与流体的交互。目前,有关海浪的流-固耦合问题主要考虑波浪与固体之间的相互作用,如在水面上运动船与水的交互作用,船舶靠离码头过程中船、水与码头之间的交互作用以及钻采平台与波浪之间的交互作用等。波浪与结构物的交互作用等流-固耦合的重要特征为两相介质之间的相互作用,即固体在流体力的作用下产生变形和运动,同时固体的变形和运动又使流场发生变化,两

种作用相互耦合。

流-固耦合模拟的早期研究只处理了单向作用,不足以表现真实的流-固耦合作用,很多学者开始转向流体与固体的双向交互的研究。Génevaux 等^[36]采用 MAC(Marker and Cells)方法来模拟流体流动,以弹簧-质点模型的质点集合来表示固体,该方法的缺点是很难对任意形状的固体进行建模;Takahashi 等^[37]将固体的速度作为 N-S 方程的边界条件,利用液体的压强在固体表面计算固体受到的力;Müller^[38]和 Kipfer^[39]分别模拟了向杯中倒水和河水从山间流淌下来的效果,其中物体对水只起阻碍作用;Klingner 等^[40]在 Génevaux 的研究基础上将固体的质量在液体的密度场上进行叠加,以模拟薄片物体(如布料)与液体之间的相互作用;Batty 等^[41]提出一种快速变分的方法,即以势能最小化的原理对边界进行离散,从而可以进行更精确的流-固耦合模拟。

此外,多数研究将流-固耦合的固体都假定为刚体,即固体在受到流体作用时不考虑自身的形变。Carlson 等^[42]对此进行了改进,提出了刚性流体的概念,将刚体作为流体的一部分融入到流体的整个计算过程中,对刚体运动的求解是通过围绕质心的平动和转动来进行的。Guendelman 等^[43]将刚体的运动方程与流体的气压方程合并到同一个线性方程组中,使得运动方程可以同时求解。Chentanez 等^[44]将 Guendelman 方法扩展到流体与可变形物体之间的相互作用。Müller 等^[38]通过在固体网格上增加采样点来处理流体粒子与固体之间的作用,但随着固体网格数量的增加,其计算速度将大幅度下降。Lazo 等^[45]使用 LBM 计算浅水方程对流体建模,并计算浮力、拖力和升沉力输入至物理引擎对物体发生的作用,反过来物体形变又对流体产生影响,在流体表面和物体之间实现了流固双向交互模拟。Liu 等^[46]利用 GPU 加速,采用匹配分层的思想并结合海面高度场,来确保网格边界波动的连续性和稳定性,实现了流体与刚体之间的交互,该方法较好地模拟了船舶与水面之间的动态交互,能实现泡沫、船行波等效果,且速度较快,但不能模拟波浪破碎。

近年来,SPH 方法常用于模拟流-固耦合,该方法在物体变形时无需进行网格重构,在模拟可变形物体与流体的交互时有一定的优势。Desbrun 等^[47]最早使用 SPH 方法来模拟大变形体;Müller 等^[48]最早提出了使用 SPH 模拟自由表面流体及交互作用的方法。此后,各种 SPH 模拟流体的算法被用于流-固耦合。如 Sonthaler 等^[32]针对流体的不可压缩性采用 PCISPH(Predictive-corrective incompressible SPH)对流固耦合进行模拟。Adams 等^[49]利用 SPH 方法结合自适应粒子采样算法,增加流体表面细节的模拟,实现了水流过山谷的效果。Solenthaler 等^[50]采用多层次模型提高模拟流体的速度。Lenaerts 等^[51]模拟了 SPH 流体对可变形及可渗透物体之间的相互作用,但未考虑到物体的破裂现象。陈沸镔等^[52]分别使用 SPH 与 FEM 对流体与固体建模,采用快速分离液体边界粒子与固体进行交互的方法,以及虚节点的流-固耦合模型模拟了液-固相互作用力,实现了水管崩裂和水冲堤坝的效果。但是,该耦合算法中固体的建模是采用基于 FEM 方法,而 FEM 在处理不连续问题(如动态裂纹扩展、大变形等)时有较大的困难,使得模拟的固体变形效果较小,裂纹的处理也过于单一。Meteer^[53]使用 SPH 对流体和固体建模,提出一种实现流固交互的算法,并利用 NVIDIA CUDA 进行加速。

Jo 等^[54]以椭球核函数取代球体核函数作为影响域,采用 SPH 方法实现了水坝坍塌的效果,见图 2。

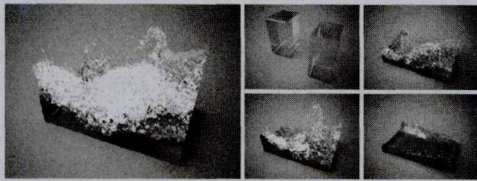


图 2 Jo 等实现的 3D 水坝坍塌效果

2.3 两相流和多相流

在物理学上,物质分固、液、气和等离子体四相或四态。单相物质及两相混合均匀的气体或液体的流动都属于单相流;同时存在两种或两种以上相态的物质混合体的流动称为两相或多相流。两相流有气-固流、液-固流和气-液流等,对于由不相溶的两种液体组成的液-液流,由于在运动规律上与气-液流和液-固流很接近,因此也把它视为一种两相流。多相流一般有空气-水-沙、气-油-沙等三相流和气-油-水-沙等四相流。目前,在计算机图形学研究领域中,主要研究不同不相溶的两种液体组成的液-液流、气-液流和液-固流,如在海上漂流的溢油、水中的气泡、河流中悬浮的泥沙等。多相流体介质及它们之间、或其与环境之间的相互作用构成了自然界众多的自然景象,如沙尘暴、海啸巨浪扑岸、暴风雨、泥石流、火焰等,这类现象不仅具有大尺度的单向或多相的流体运动,还常常涉及到复杂的相互作用机制,甚至产生固体形变、崩裂、破碎、坍塌等问题,涉及到多种介质、多种相变、多种互动的复杂机理,呈现出变化多端的或奇特或震撼的大尺度动态效果。

Müller 等^[55]利用 SPH 方法模拟多相流,实现了液液交互和小气泡融合成大气泡的效果。Hong 等^[56]提出同时考虑液体和气体的运动,并使用界面追踪和 VOF 方法描述流体的界面,之后又使用近似的浮力公式描述微小气泡的运动^[57]。Zheng 等^[58]提出了区域 Level Set 方法,用于模拟气泡在水面上漂浮的现象。Premoze 等^[11]采用 MPS 方法模拟了两种不同密度和黏度的液体混合的过程,该方法采用 Level Set 方法实现液体表面的抽取,但在液体与固体或另外一种液体界面存在不平滑的问题。朱红斌等^[59]基于二元 LBM 实现了两种液体组成的混合流的模拟。武小龙等^[60]使用扩展的 VOF 方法处理多种不可相溶流体问题,它可以继承 VOF 方法中保持流体体积不变的特性,更好地模拟流体的运动。Orthmann 等^[61]采用 Adaptive SPH 方法实现了两种不相溶液体的混合模拟。Busaryev 等^[62]在 Voronoi 图的基础上提出了一种基于粒子的动态交互气泡生成算法,该算法更准确、高效地实现了气液两相流的模拟,气泡和泡沫的模拟效果见图 3。



图 3 Busaryev 等实现的气泡和泡沫的效果

3 加速策略

在海浪模拟动画的研究中,在追求真实感海浪模拟的同时,实时性同样需要研究者给予重点关注。因此,N-S 方程的简化、并行计算和数据结构的改进等成为近年来海浪模拟研究的重点。对海浪建模进行合理的简化、加速以达到实时仿真的要求,无疑对虚拟海战场、航海模拟、海难救助等应用领域具有重大的应用价值。

3.1 简化模型

浅水方程和 Boussinesq 方程等引入一些假设条件对 N-S 方程进行简化,相比三维的 N-S 方程,它们在同等规模的模拟中只需要极少的计算资源,以满足大规模场景实时模拟的需要。但是对于复杂的景象,如水滴的溅入、流固耦合等,其通常无法处理。浅水方程是一组描述流体压力表面之下流动的双曲偏微分方程。它忽略了竖直方向上压力对流体的影响,故不需要考虑竖直方向上的速度变化,其在数值求解中只需要求解对流方程。浅水方程模型适合于模拟邻近海岸时的波动传播,如 Thürey 等^[21]实时模拟了邻近海岸处波浪的振幅不断增大的现象。波函数模型同时舍弃了速度对流和竖直方向上压强的变化,其在数值求解中只需要求解关于高度的泊松方程。Lake 等^[63]利用 Intel 多核体系结构实时模拟正弦波浪的运动。在波动模拟中,如果不考虑耗散效应,则系统中的能量保持不变,其表现为振幅不随着模拟时间而衰减。Chiu 等^[64]针对通常离散格式的耗散问题设计了新的离散算法,以保持系统中的能量恒定。

Boussinesq 方程通过假定水平速度沿水深为常数,垂向速度沿水深呈线性分布,将三维波动问题简化为二维问题,使问题得以简化。Boussinesq 方程模型是一种非线性波浪模型,能模拟波浪的传播、波浪的反射及实际地形条件的综合变形,不易于模拟波浪破碎效果。李永进等^[65]使用 2D Boussinesq 方程求得指定海域一段时间内的海面运动序列,然后通过对此序列进行重建,得到“无限”长的海面运动序列,最后把相应的海面高度场作为顶点纹理进行绘制,实现了大面积近岸海浪的模拟,该方法未能实现海浪卷曲、浪花飞溅等效果,且海面高度场数据需离线解算。

3.2 并行计算

随着海浪场景规模的增大,基于物理的真实感海浪模拟所需的计算资源很快地超过了系统资源。近年来,并行机和 GPU 的发展为研究者提供了越来越多的系统资源,大量的研究工作转向将现有的算法移植到并行体系结构中。通常的做法是将计算区域分为不同的区块,而每一个区块在一个计算核心上单独计算;区块的边界条件通过计算核心之间的通信完成。Ihmsen 等^[66]提出了在 multicore CPU 平台上并行的 SPH 方法,且对粒子搜索进行了并行化,实现了流体模拟。随着可编程图形硬件的快速发展,GPU 除用于 3D 渲染外,还用于通用计算,很多算法也得以在 GPU 上实现^[67],如稀疏矩阵的求解^[68]和快速傅里叶变换^[69,70]。

而基于粒子的流体模拟展示了高度的数据并行性和高强度的计算需求,因而非常适合在 GPU 上实现。Harris^[71]在 GPU 上实现了半拉格朗日流体的模拟。柳有权等^[72]采用该方法在 GPU 上实现了带有复杂边界的三维实时流体模拟。Amada 等^[73]在 GPU 上实现了 SPH 流体的模拟,但由于其模拟过程中需要 CPU 参与构造邻近粒子表,使得 CPU 与 GPU

之间的数据传输和处理成为了瓶颈。Kolb 等^[74]则在 GPU 中实现了整个 SPH 过程,但是由于该算法在网格上进行计算、在粒子上进行插值,会造成物理上的不连续错误,效果并不真实。Harada 等^[75]通过在 GPU 上构造覆盖了整个计算区域的均匀网格来实现邻近粒子的查找。然而,在粒子较为分散的情况下,网格内会包含大量的空闲网格单元,从而使得 GPU 的显存利用率较低。

近几年,NVIDIA 公司 CUDA 架构的出现大大推进了 GPU 在流体模拟加速上的应用。Hérault 等^[76]利用 NVIDIA 的 CUDA 架构在 GPU 上实现了 SPH 方法,对邻域粒子链表的生成、SPH 流体方程的计算和粒子的更新进行了并行化。温娟娟等^[77]在 GPU 上对邻域粒子链表的生成、快速查找、SPH 流体方程的计算进行了并行化,渲染流体时,通过在顶点着色器中进行纹理采样并利用粒子坐标缓存数据直接更新流体粒子系统的顶点缓存,避免了 CPU 与 GPU 之间的数据传输,充分利用 GPU 的并行性,大幅度提高了流体模拟和渲染的整体性能。2010 年,陈曦等^[78]在 GPU 上实现了 SPH 方法的非均匀自适应采样方法,并通过并行排序算法加快了粒子查找,与已有的 SPH 流体 CPU 模拟方法相比,其加速比达到 2 个数量级以上。Liu 等^[79]用多 GPU 对基于半拉格朗日方法的流体计算进行了加速。

3.3 数据结构的改进

目前,随着场景规模的增大,GPU 所能提供的系统资源仍不能满足基于物理的真实感海浪模拟所需的计算资源。因此,需要改进数据结构,降低模拟所采用的总粒子数。而基于欧拉法的流体模拟,其数据结构的改进主要在于优化计算网格,如基于二叉树的自适应网格^[80]等。Irving 等^[25]将流体在垂直方向上的网格离散成非均匀自适应网格以减少网格数。Feldman^[81]和 Klingner^[40]等通过优化四面体网格生成来减少一定的计算量。Chentanez 等^[29]采用长条单元和规则单元相结合的方法来减少计算单元数目,长条单元的物理量集中在单元的底部和顶部,这样计算主要集中在水面附近。

基于拉格朗日的流体模拟,如 SPH 方法,提高模拟效率的关键是粒子的查找和排序算法,早期大多采用全区域搜索算法,其时间复杂度为 $O(n^2)$ 。Harada 等^[75]提出利用空间网格进行邻域粒子的搜索,从而大大提高了搜索的效率,将时间复杂度降为 $O(n \log n)$,其缺陷是每个网格最多只能包含 4 个粒子,且不能进行并行化。为了快速地获得邻域粒子的信息,需要对粒子以网格进行排序,进一步提高模拟效率。目前,基数排序、快速排序以及合并排序均已经有效地实现了 GPU 并行化。Green^[82]进一步改善了邻域粒子搜索,并在 CUDA 架构上实现了该算法的并行化。陈曦等^[78]在此基础上,进一步提出非均匀采样的思想,减少了实际模拟时所需要的粒子数,提高了模拟效率。

结束语 综上所述,为了能够模拟更逼真的海浪,研究主要着眼于物理模型的选择和对细节加强处理。大规模海浪的真实感模拟与有限的系统资源之间仍有一定的距离,如何提升海浪模拟的效率将是未来的研究重点。而波浪的翻卷和破碎、流固耦合、两相流和多相流的模拟仍然是研究的热点和主要方向。目前,N-S 方程的简化模型浅水方程适合于模拟大规模海浪,而基于拉格朗日粒子的方法如 SPH 则更适用于表达波浪的翻卷、破碎浪的模拟和流固交互等特效。在基于物理的海浪模拟的方法中,LBM 在海浪模拟中受关注的程度逐

渐下降,主流发展方向主要是混合欧拉网格法和基于拉格朗日粒子的 SPH 方法。针对有限的系统资源与随规模增长的计算资源之间的矛盾,未来结合多种模拟方法的优点,寻求流体高效的自适应混合建模,改进数据结构,并在此基础上实现 GPU 并行化,将是基于物理的海浪模拟的发展方向。随着 GPU 计算能力的指数级增长,加上高效的数据结构,必将实现实时大规模真实感海浪的模拟,这将给虚拟海战场、航海模拟、海难救助、飞行模拟、三维游戏、影视特技等众多虚拟现实应用领域带来飞速的发展。

参考文献

- [1] Johanson C, Lejdfors C. Real-time water rendering: introducing the projected grid concept[D]. Lund: Lund University, 2004
- [2] 李广鑫,丁振国,詹海生,等.一种面向虚拟环境的真实感水波面建模算法[J].计算机研究与发展,2004,41(9):1580-1585
- [3] Tessendorf J. Simulating ocean water[J]. Simulating Nature: Realistic and Interactive Techniques, SIGGRAPH, 2001
- [4] 杨怀平,孙家广.基于海浪谱的波浪模拟[J].系统仿真学报,2002,14(9):1175-1178
- [5] 陈晓露,陈标,张本涛,等.基于文氏方向谱的海浪仿真技术研究[J].计算机仿真,2012,29(10):409-413
- [6] Fréchet J. Realistic simulation of ocean surface using wave spectra[J]. Realistic simulation of ocean surface using wave spectra, 2006:76-83
- [7] 李苏军,宋汉辰,吴玲达.海浪实时建模与绘制技术研究[J].系统仿真学报,2006,18(1):255-257
- [8] 尹勇,任鸿翔,张秀凤,等.航海仿真虚拟环境的海浪视景生成技术[J].系统仿真学报,2002,14(3):313-315
- [9] 黄玲,王长波,杨波,等.卷浪的真实感建模与绘制[J].计算机工程与应用,2009,45(32):164-167
- [10] 柳有权,刘学慧,朱红斌,等.基于物理的流体模拟动画综述[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(12):2581-2589
- [11] Premoze S, Tasdizen T, Bigler J, et al. Particle-Based Simulation of Fluids[C]//Computer Graphics Forum. 2003:401-410
- [12] Becker M, Teschner M. Weakly compressible SPH for free surface flows[C]//Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation. 2007:209-217
- [13] Wei X, Li W, Mueller K, et al. The Lattice-Boltzmann method for simulating gaseous phenomena[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004,10(2):164-176
- [14] Rude U, Thürey N. Free surface lattice-Boltzmann fluid simulations with and without level sets[M]. Vision, Modeling and Visualization 2004. Stanford: Ios Press:199-208
- [15] Zhu H, Bao K, Wu E, et al. Stable and efficient miscible liquid-liquid interactions[C]//Proceedings of the 2007 ACM symposium on Virtual reality software and technology. 2007:55-64
- [16] 王长波,张卓鹏,张强,等.基于 LBM 的自由表面流体真实感绘制[J].计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(1):104-110
- [17] Enright D, Marschner S, Fedkiw R. Animation and rendering of complex water surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2002,21(3):736-744
- [18] Stam J, Fiume E. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes[C]//Proceedings of the 22nd annual conference on computer graphics and interactive techniques. 1995:129-136
- [19] Takeshita D, Ota S, Tamura M, et al. Particle-based visual simulation of explosive flames[C]//Proceedings 11th Pacific Confe-

- rence on Computer Graphics and Applications, 2003. 2003; 482-486
- [20] Müller M, Charypar D, Gross M. Particle-based fluid simulation for interactive applications[C]//Proceedings of EUROGRAPHICS/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. San Diego, 2003; 154-159
- [21] Thürey N, Müller-Fischer M, Schirm S, et al. Real-time breaking waves for shallow water simulations[C]//15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications(PG'07). 2007; 39-46
- [22] Losasso F, Talton J O, Kwatra N, et al. Two-way coupled SPH and particle level set fluid simulation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(4); 797-804
- [23] Mihalef V, Metaxas D, Sussman M. Animation and control of breaking waves [C] // Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation. 2004; 315-324
- [24] Thürey N, Rude U. Stable free surface flows with the lattice Boltzmann method on adaptively coarsened grids[J]. Computing and Visualization in Science, 2009, 12(5); 247-263
- [25] Irving G, Guendelman E, Losasso F, et al. Efficient simulation of large bodies of water by coupling two and three dimensional techniques[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2006, 25(3); 805-811
- [26] Thürey N, Rude U, Stamminger M. Animation of open water phenomena with coupled shallow water and free surface simulations[C]//Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation. 2006; 157-164
- [27] Tan J, Yang X, Zhao X, et al. A multi-layer grid approach for fluid animation[J]. Science China Information Sciences, 2011, 54(11); 2269-2278
- [28] 武小龙, 吴恩华, 张辉. 大规模场景流体模拟的耦合算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(6); 1028-1033
- [29] Chentanez N, Müller M. Real-time Eulerian water simulation using a restricted tall cell grid[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2011, 30(4); 82
- [30] Wang Q, Zheng Y, Chen C, et al. Efficient rendering of breaking waves using MPS method[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2006, 7(6); 1018-1025
- [31] Onderik J, Chládek M, Durikovic R. Sph with small scale details and improved surface reconstruction[C]//Proceedings of the Spring Conference on Computer graphics(SCCG'11). 2011
- [32] Solenthaler B, Pajarola R. Predictive-corrective incompressible SPH[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(3); 40
- [33] 延诃, 王章野, 廖斌斌, 等. 基于物理的海浪场景的真实感建模与绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(9); 1117-1125
- [34] 神和龙, 尹勇, 孙霄峰, 等. 航海模拟器中破碎浪的建模[J]. 中国航海, 2012, 35(1); 23-26
- [35] Ihmsen M, Akinci N, Akinci G, et al. Unified spray, foam and air bubbles for particle-based fluids [J]. The Visual Computer, 2012, 28(6-8); 669-677
- [36] Gènevaux O, Habibi A, Dischler J-M. Simulating fluid-solid interaction[C]//Graphics Interface. 2003; 31-38
- [37] Takahashi T, Ueki H, Kunimatsu A, et al. The simulation of fluid-rigid body interaction[C]//ACM SIGGRAPH 2002 conference abstracts and applications. 2002; 266
- [38] Müller M, Schirm S, Teschner M, et al. Interaction of fluids with deformable solids[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2004, 15(3/4); 159-171
- [39] Kipfer P, Westermann R. Realistic and interactive simulation of rivers[C]//Proceedings of Graphics Interface 2006. 2006; 41-48
- [40] Klingner B M, Feldman B E, Chentanez N, et al. Fluid animation with dynamic meshes [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2006, 25(3); 820-825
- [41] Batty C, Bertails F, Bridson R. A fast variational framework for accurate solid-fluid coupling[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2007, 26(3); 100
- [42] Carlson M, Mucha P J, Turk G. Rigid fluid: animating the interplay between rigid bodies and fluid[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2004, 23(3); 377-384
- [43] Guendelman E, Selle A, Losasso F, et al. Coupling water and smoke to thin deformable and rigid shells[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2005, 24(3); 973-981
- [44] Chentanez N, Goktekin T G, Feldman B E, et al. Simultaneous coupling of fluids and deformable bodies[C]//Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. 2006; 83-89
- [45] Lazo M, Bauza C G, Boroni G, et al. Real-Time Physical Engine for Floating Objects with Two-Way Fluid-Structure Coupling [J]. World Applied Sciences Journal, 2013, 22(12); 1685-1694
- [46] Liu S, Xiong Y. Fast and stable simulation of virtual water scenes with interactions[J]. Virtual Reality, 2013, 17(1); 77-88
- [47] Desbrun M, Gascuel M P. Smoothed particles: A new paradigm for animating highly deformable bodies[C]//Computer Animation and Simulation '96. Springer, 1996; 61-76
- [48] Müller M, Charypar D, Gross M. Particle-based fluid simulation for interactive applications[C]//Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. 2003; 154-159
- [49] Adams B, Pauly M, Keiser R, et al. Adaptively sampled particle fluids[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2007, 26(3); 48
- [50] Solenthaler B, Gross M. Two-scale particle simulation [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2011, 30(4); 81
- [51] Lenaerts T, Adams B, Dutré P. Porous flow in particle-based fluid simulations[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2008, 27(3); 49
- [52] 陈沸饒, 王长波, 谢步瀛, 等. 流-固交互及可变形体破裂的真实感模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(8); 997-1002
- [53] Meteer O. Interaction between SPH Fluids and Dynamic Particle-Based Objects using CUDA[C]//Proceedings of the 15th. Twente Student Conference on IT 2011. 2001
- [54] Jo E, Kim D, Song O-Y. A new SPH fluid simulation method using ellipsoidal kernels [J]. Journal of Visualization, 2011, 14(4); 371-379
- [55] Müller M, Solenthaler B, Keiser R, et al. Particle-based fluid-fluid interaction[C]//Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation. 2005; 237-244
- [56] Hong J M, Kim C H. Animation of bubbles in liquid[J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3); 253-262
- [57] Hong J M, Lee H Y, Yoon J C, et al. Bubbles alive[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2008, 27(3); 48

- [2] Walther J S. A unified algorithm for elementary functions[J]. AFIPS Spring Joint Computer Conference, 1971, 38: 379-385
- [3] Lei Zhi-hua. The design of NCO based on CORDIC algorithm and implementation in FPGA[C]// 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (IECECC). 2011:2902-2905
- [4] Considine V. CORDIC Trigonometric Function Generator for DSP[C]// International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-89. 1989, 4: 2381-2384
- [5] Wang Xiao-chu. High-Precision Design of DDS Based on FPGA [C]// 2012 Third Global Congress on Intelligent Systems (GCIS). 2012:386-389
- [6] Wu C S, Wu A Y, Lin C H. A high-performance/low-latency vector rotational CORDIC architecture based on extended elementary angle set and trellis-based searching schemes[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. , 2003, 50(9): 589-601
- [7] 李美俊, 李光明. 基于嵌入式的 CORDIC 算法的改进及实现 [J]. 微电子学与计算机, 2012, 55(2): 33-34
- [8] Sumanasena M G B. A scale factor correction scheme for the CORDIC algorithm[J]. IEEE Trans. Comput. , 2008, 57(8): 1148-1152
- [9] Vachhani L, Sridharan K, Meher P K. Efficient CORDIC algorithms and architectures for low area and high throughput implementation[J]. IEEE Trans. Circuit Syst. , 2009, 56(1): 61-65
- [10] Maharatna K, Banerjee S, Grass E, et al. Modified virtually scaling-free adaptive CORDIC rotator algorithm and architecture [J]. IEEE Trans. Circuits Syst. , 2005, 11(11): 1463-1474
- [11] Jaime F J, Sanchez M A, Hormigo J, et al. Enhanced scaling-free CORDIC[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. , 2010, 57(7): 1654-1662
- [12] 常柯阳, 曾岳南. CORDIC 算法在正弦余弦函数中的应用及其 FPGA 实现[J]. 计算机工程与应用, 2013, 34(7): 143-144
- [13] Baese U M. Digital signal processing with field programmable gate arrays[M]. 刘凌, 胡永生, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003

(上接第 6 页)

- [58] Zheng W, Yong J H, Paul J C. Simulation of bubbles[J]. Graphical Models, 2009, 71(6): 229-239
- [59] 朱红斌, 刘学慧, 柳有权, 等. 基于 Lattice Boltzmann 模型的液-液混合流模拟[J]. 计算机学报, 2006, 29(12): 2071-2079
- [60] 武小龙, 吴恩华. 气泡的生成和多种流体的模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010(9): 1463-1467
- [61] Orthmann J, Kolb A. Temporal Blending for Adaptive SPH [J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(8): 2436-2449
- [62] Busaryev O, Dey T K, Wang H, et al. Animating bubble interactions in a liquid foam [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2012, 31(4): 63
- [63] Reagin D, Lake A. Real-Time Deep Ocean Simulation on Multi-Threaded Architectures[EB]. <https://software.intel.com/en-us/articles>
- [64] Chiu P, Lee L, Sheu T W. A dispersion-relation-preserving algorithm for a nonlinear shallow-water wave equation[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(21): 8034-8052
- [65] 李永进, 金一丞, 任鸿翔, 等. 基于物理模型的近岸海浪建模与实时绘制[J]. 中国图象图形学报, 2010(3): 518-523
- [66] Ihmsen M, Akinci N, Becker M, et al. A Parallel SPH Implementation on Multi-Core CPUs [J]. Computer Graphics Forum, 2011, 30(1): 99-112
- [67] Buck I, Purcell T. A toolkit for computation on GPUs[M]// GPU Gems. Addison-Wesley Professional 2004: 621-636
- [68] Bolz J, Farmer I, Grinspun E, et al. Sparse matrix solvers on the GPU: conjugate gradients and multigrid[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2003, 22(3): 917-924
- [69] Moreland K, Angel E. The FFT on a GPU[C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware. 2003: 112-119
- [70] Sumanaweera T, Liu D. Medical image reconstruction with the FFT[J]. GPU Gems, 2005(2): 765-784
- [71] Harris M. Fast fluid dynamics simulation on the GPU[J]. GPU gems, 2004(1): 637-665
- [72] 柳有权, 刘学慧, 吴恩华. 基于 GPU 带有复杂边界的三维实时流体模拟[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 568-576
- [73] Amada T, Imura M, Yasumuro Y, et al. Particle-based fluid simulation on GPU [C]// ACM Workshop on General-Purpose Computing on Graphics Processors and SIGGRAPH. 2004
- [74] Kolb A, Cuntz N. Dynamic particle coupling for GPU-based fluid simulation[C]// Proc. Symposium on Simulation Technique. 2005: 722-727
- [75] Harada T, Koshizuka S, Kawaguchi Y. Smoothed particle hydrodynamics on GPUs [C]// Computer Graphics International. 2007: 63-70
- [76] Hérault A, Bilotta G, Dalrymple R A. SPH on GPU with CUDA [J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(S1): 74-79
- [77] 温婵娟, 欧嘉蔚, 贾金原. GPU 通用计算平台上的 SPH 流体模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010(3): 406-411
- [78] 陈曦, 王章野, 何骥, 等. GPU 中的流体场景实时模拟算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010(3): 396-405
- [79] Liu Y, Shi K, Deng H, et al. A multi-GPU based semi-Lagrangian fluid solver[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry. 2011: 321-326
- [80] Losasso F, Gibou F, Fedkiw R. Simulating water and smoke with an octree data structure[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2004, 23(3): 457-462
- [81] Feldman B E, O'Brien J F, Klingner B M. Animating gases with hybrid meshes [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2005, 24(3): 904-909
- [82] Green S. Cuda particles[M]. NVidia Whitepaper, 2008