

文章编号:1674-2869(2019)03-0303-04

SPH 真实感流体交互模拟的改进算法

程志宇^{1,2}, 徐国庆^{*1,2}, 张岚斌^{1,2}, 许 犇^{1,2}

1. 武汉工程大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 智能机器人湖北省重点实验室(武汉工程大学), 湖北 武汉 430205

摘 要:针对目前流体仿真中存在的模拟效率低及模拟交互的真实感不足等问题,提出一种基于光滑粒子流体动力学的流体模拟改进算法。首先,采用光滑粒子流体动力学方法进行粒子系统建模,通过矫正压力及速度场保证流体求解方程的精确性和稳定性;然后通过简化流体计算模型,完成流体表面建模,提高流体表面渲染速度;最后使用硬件加速算法实现流体模拟的快速渲染,提高流体的真实感和交互的实时性。实验结果表明,该算法能够明显提升流体渲染的真实感,减小计算复杂性。大规模粒子实时模拟帧率达到20帧/s,实现了较为真实的交互应用。

关键词:流体模拟;光滑粒子流体动力学方法;硬件加速

中图分类号:TP391 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2019.03.018

Improved Algorithm for Realistic Fluid Interactive Simulation Based on Smoothed Particle Hydrodynamics

CHENG Zhiyu^{1,2}, XU Guoqing^{*1,2}, ZHANG Lanbin^{1,2}, XU Ben^{1,2}

1. School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Hubei Key Laboratory of Intelligent Robot(Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China

Abstract: To solve the low efficiency and reality in the real fluid simulation, this paper presents an improved smoothed particle hydrodynamics movement simulation algorithm. Firstly, the particle system was modeled by smoothed particle hydrodynamics method. The accuracy and stability of the fluid solution equation was improved by correcting the pressure and velocity fields. Secondly, the water surface was modeled and the rendering speed of the fluid surface was optimized by simplifying the fluid particles calculation. Finally, the hardware acceleration algorithm was used to achieve faster fluid rendering. The experimental results show that the algorithm can significantly enhance the reality of fluid rendering and reduce the computational complexity. In large-scale particle real-time simulation, the frame rate reaches 20 frames per second, which realizes a real interactive application.

Keywords: fluid simulation; smoothed particle hydrodynamics; hardware acceleration

真实感流体模拟是计算机图像学领域中的研究热点,不管是在电视特效和广告、电子游戏亦或是军用作战平台仿真、虚拟医学等领域中都有着广泛的应用。基于物理的流体模拟的计算模型应

该包括流体每一时刻的运动方向、受力情况以及在运动过程中流体间的相互作用力等,同时为了更好的提高真实感要增强细节模拟^[1-2],展现实时流动的视觉效果。

收稿日期:2019-01-02

基金项目:湖北省自然科学基金(2014CFB786)

作者简介:程志宇,硕士研究生。E-mail:czychengzhiyu@163.com

*通信作者:徐国庆,博士,副教授。E-mail:124148659@qq.com

引文格式:程志宇,徐国庆,张岚斌,等. SPH 真实感流体交互模拟改进算法[J]. 武汉工程大学学报,2019,41(3): 303-306.

现阶段,对于流体模拟主要采用欧拉网格法和拉格朗日粒子法两种方法来求解计算流体动力学中的控制方程。欧拉法是模拟流体在固定网格单元上的运动,将流体离散成空间中的固定点,空间点的物理属性包括密度、速度、压强等,通过固定点的属性变化,来模拟流体的运动过程,基于网格的方法可以非常有效地模拟蒸汽和烟雾这样的体积效应^[3-4]。而基于粒子的拉格朗日法则是跟踪单个流体粒子的运动,并记录其物理属性变化,来完成对流体的模拟。拉格朗日粒子法在保持自由表面的质量或体积方面有明显优势。

基于上述分析,针对真实感流体具有的复杂动力学特性,提出一种在基于通用光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法上建立的流体模型,利用粒子模拟流体运动过程,SPH初始化完成粒子创建,相邻粒子根据划分的网格单元进行交互。根据粒子的空间位置构建流体密度场计算粒子密度、压力、粘滞力、外力等,采用固定镜像粒子方法^[5]处理交互边界问题^[6-7]。通过移动立方体(marching cubes, MC)算法来重建流体网格^[8-10],实现对流体表面建模,光照计算实现反射和折射效果,完成对流体的高质量交互式渲染^[11],形成更逼真的动态演示效果。

1 流体建模算法

SPH方法是模拟流体流动的一种拉格朗日形式的无网格粒子法。它的理论基础是粒子方法,由于粒子的运动与流体的运动相似,可以用经典牛顿流体动力学的控制方程来模拟。与传统的流体模拟方法相比,采用SPH方法能够比较真实的模拟流体运动过程,对于边界不连续问题,大面积变形问题,模拟破裂合并以及飞溅等,SPH方法可以很好的解决。

它的核心思想是用一系列任意分布的粒子来表示问题域,粒子之间不需要任何连接,用积分形式来近似场函数,再通过局部区域(支持域)的相邻粒子所携带的计算数值叠加求和来取代场函数及其导数的积分表示式,实现进一步近似。在每一个时间步中都要进行粒子近似,因此当前粒子的性质取决于当前局部分布的粒子。

1.1 流体运动方程

基于拉格朗日的流体运动方程可由连续性方程(1)、运动方程(2)、压力状态方程(3)表示^[12]。

$$\frac{d\rho}{dt} = -\nabla\rho \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{g} - \frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu \nabla^2 \mathbf{v}}{\rho} \quad (2)$$

$$p = k \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (3)$$

其中: \mathbf{v} 为速度, p 为压力, ρ 为密度, μ 为动力学黏性系数, $k=200 \frac{gH}{\rho\gamma}$, $\gamma=7$, H 为流体高度, g 为重力加速度,可引入人工黏性项 Π 来修正运动方程。

$$\Pi_{ij} = \alpha \frac{h_{ij} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)}{\rho_{ij} \mathbf{r}_{ij}^2 + \eta^2} \quad (4)$$

式(4)中: α 是0到1之间的常系数, \mathbf{v} 是流体速度, \mathbf{r} 是粒子的位置矢量, η 是保证分母不为零的参数, h 是光滑核半径。显然,拉格朗日方法是针对于相对独立的各个流体粒子来求解运动方程,通过积分计算流体粒子下一时刻的物理属性值变化。

1.2 SPH基本方程

在SPH方法中,问题域是用具有质量和体积大小的有限粒子表示,通过对粒子物理属性插值计算区域任一点的对应值:

$$A(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} A(\mathbf{r}_j) W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \quad (5)$$

其中: $A(\mathbf{r})$ 是位置 \mathbf{r} 的物理属性; N 为粒子 j 在支持域中的粒子总数; m_j 是粒子 j 的质量; ρ_j 是粒子 j 的密度;函数 W 为光滑核函数, h 为光滑核半径,光滑核函数具有2个性质:首先必须是偶函数,满足 $W(-\mathbf{r})=W(\mathbf{r})$;其次,必须为规整函数,满足 $\int W(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = 1$ 。

在SPH方法中,导数只影响光滑核。光滑属性函数 $A(\mathbf{r})$ 的梯度以及拉普拉斯算子:

$$\nabla A(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} A(\mathbf{r}_j) \nabla W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \quad (6)$$

$$\nabla^2 A(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} A(\mathbf{r}_j) \nabla^2 W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \quad (7)$$

2 改进算法

2.1 粒子建模

流体方程计算时,首先在密度场应用式(5)计算粒子的求和密度 ρ ,使用Poly6核函数估计:

$$\rho_i = \sum_{j \neq i} m_j W_1(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) \quad (8)$$

将式(6)和式(7)代入运动方程并进行对称化,得到作用在粒子上的压力 F_i^{pressure} 和黏度力 $F_i^{\text{viscosity}}$ 。位于不同压强区的粒子间的相互作用力不等,所以采用相互作用粒子压强的算术平均值

来优化计算式。

$$F_i^{\text{pressure}} = - \sum_{j \neq i} m_j \frac{p_i + p_j}{2\rho_j} \nabla W_2(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) \quad (9)$$

$$F_i^{\text{viscosity}} = \mu \sum_{j \neq i} m_j \frac{\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i}{\rho_j} \nabla^2 W_3(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) \quad (10)$$

其中,基于计算精度和效率,估计计算选择核函数形式如下:

$$W_2(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} \frac{15}{\pi h^6} (h - |\mathbf{r}|)^3 & 0 \leq |\mathbf{r}| \leq h \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$W_3(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} \frac{15}{2\pi h^3} \left(-\frac{|\mathbf{r}|^3}{2h^3} + \frac{|\mathbf{r}|^2}{h^2} + \frac{h}{2|\mathbf{r}|} - 1 \right) & 0 \leq |\mathbf{r}| \leq h \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

最后计算得出流体的加速度 a ,进行速度场的更新。

$$a_i = 1/\rho_i \left(F_i^{\text{pressure}} + F_i^{\text{viscosity}} + F_i^{\text{external}} \right) \quad (13)$$

式(13)中, F_i^{external} 是外部力,如重力、表面张力等。

模拟流体动态效果的 SPH 流体粒子模型算法的基本流程如图 1 所示。

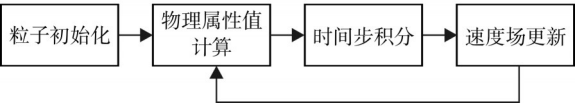


图 1 SPH 粒子系统建模流程
Fig. 1 Modeling flowchart of SPH particle system

此 SPH 模型适合用来求解高速碰撞过程中的流体大变形的问題,通过不断循环迭代修正密度差^[13-14],对流体的形状和运动状态都能模拟较真实效果,模拟具有有效性和高效性。

2.2 自由表面建模和渲染

流体表面重建是流体模拟的重要内容。在未实现自由界面的重构和渲染时,用 SPH 方法得到的是由一堆离散粒子组成的流体系统,流体的真实感以及运动连贯性欠缺。采用一种基于移动立方体(MC)算法来提取流体运动表面的真实效果,实现流体表面建模。MC 算法的核心思想是在三维离散数据场中按一定规则划分体元,在每个体元内部根据设定值对每条边进行插值,通过线性插值得到的三角面片来逼近等值面,完成等值面提取。在动画模拟过程中图形处理器(graphics processing unit, GPU)加速进行实时渲染^[15],将流体表面渲染成透明的,并进行光照计算,实现了反射和折射效果。同时流体表面的光照和纹理渲染提高了流体场景的真实感。

3 结果与讨论

3.1 实验结果

实验平台是 Intel (R) Core (TM) i7-8550U CPU 1.8 GHZ,主存 16 GB,图形卡为 NVIDIA GeForce MX150,显卡内存为 2 GB,开发环境 Visual Studio 2017,图形的编程接口由 OpenGL 提供。在图形硬件上,实验完成了对复杂流体方程的求解,同时针对于交互结果进行了实时渲染展示。实验结果显示了本文方法模拟的有效性和高效性,实时场景渲染的真实感有所提高。

图 2(a)显示了粒子系统初始形态,粒子数约为 4 000,室外场景为背景,图 2(b)是渲染后的流体系统,流体采用透明渲染,用 MC 算法构造了自由移动的流体表面的效果。其中每个粒子包含重力、压力、粘滞力、交互粒子间的引力与斥力作用。场景包括粒子的物理属性值计算、自由表面建模、光照计算和材质渲染等。

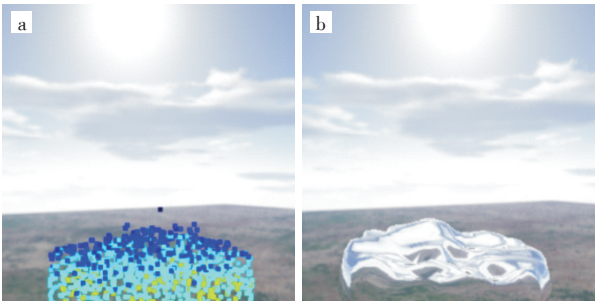


图 2 SPH 模型初始状态:(a)粒子模型,(b)流体模型
Fig. 2 Initial state of SPH models:
(a) particle model, (b) fluid model

图 3(a)展示了球体渲染模型在外部输入力的作用下运动的效果,粒子数约为 4 000。图 3(b)是透明渲染流体在外力作用下的运动效果。在模拟过程中,用户可以通过鼠标拖拽来调整流体的受力,其中每个粒子除了受到基础作用力外还受到外部输入的力的作用。在外力作用下流体表面发

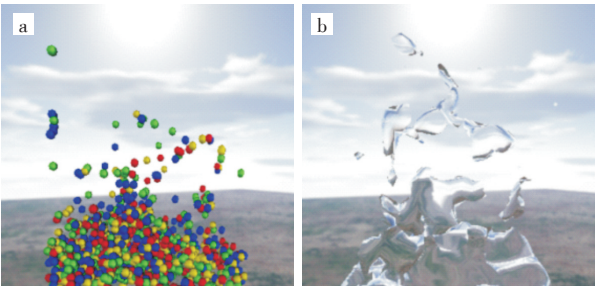


图 3 SPH 运动模型:(a)球体模型,(b)流体模型
Fig. 3 Models of SPH motion:
(a) spherical model, (b) fluid model

生剧烈变形,形成飞溅效果。

实验将木块运动与实时流体模拟相结合,通过计算木块下落位置和速度来触发与流体的动态交互,使流体产生相应形变。图 4 是流体和木块交互的动态演示效果,包括木块下沉和上浮过程、场景包括相邻网格粒子搜索和复杂的边界交互计算。

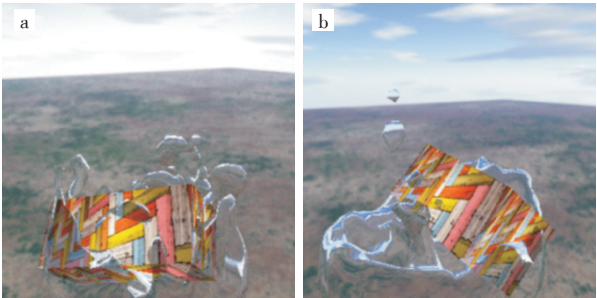


图 4 流体和木块交互模型:(a)木块下沉,(b)木块上浮

Fig. 4 Models of fluid and wood interaction:

(a)wood sinking,(b)wood floating

3.2 对比分析

小尺度的流体模型渲染速度会受到粒子数和光滑半径的影响,实验过程中通过设置对照组进行对比实验,不同粒子数和光滑半径下的渲染速度关系如表 1 所示。实验结果表明光滑半径相同,随着粒子数增加,渲染速度变慢;粒子数不变,随着光滑半径的增加,渲染速度变慢。

表 1 不同粒子数和光滑半径下的渲染帧率

Tab. 1 Rendering frame rates of different particle numbers and smoothing radii frames / s

粒子数 / 个	光滑半径		
	0.009 m	0.010 m	0.011 m
2 000	65	63	60
4 000	47	40	34
6 000	31	27	23
8 000	22	20	14

4 结 语

本文主要讨论真实感流体的模拟问题,利用基于 SPH 的数值计算法进行粒子建模,再采用 MC 算法对粒子表面建模。实验结果表明,本文提出的对于真实感流体的模拟改进算法,综合利用体绘制和面绘制法实现流体三维模拟,真实感提高,优化效果明显。但对于数值方法的固有计算损耗、细节特征模拟以及硬件加速方面要做进一步改进,提高流体模拟的效率和精度。

参考文献

[1] 崔楠,柳有权,陈凯. 关于流体模拟细节增强技术的研究[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(4): 698-701.

[2] WINCHENBACH R, HOCHSTETTER H, KOLB A. Infinite continuous adaptivity for incompressible SPH [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2017, 36(4): 1021-1029.

[3] THUEREY N. Interpolations of smoke and liquid simulations [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2017, 36(1): 301-315.

[4] 唐勇,毛菊珍,赵静,等. 欧拉模型中多烟雾自由融合实时仿真算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(5): 777-784.

[5] 朱晓临,殷竞存,汪欢欢. 改进的流体模拟固体边界处理算法[J]. 图学学报, 2018, 39(2): 263-268.

[6] 邵绪强,周忠,张劲松. 微可压缩 SPH 流体的稳定性固体边界处理算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(11): 1915-1922.

[7] 聂霄,陈雷霆. 弱可压缩流体边界处理算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(1): 206-210.

[8] 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, 22(3): 406-411.

[9] XIAO X Y, ZHANG S, YANG X. Real-time high-quality surface rendering for large scale particle-based fluids [C]//Proceedings of the 21st ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. Los Angeles: ACM, 2017: 121-128.

[10] 刘文龙,张静. 用 MC 算法优化基于 SPH 的海浪粒子模型[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(2): 41-45.

[11] 徐士彪,张晓鹏,陈彦云,等. 交互式水滴效果模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(8): 1159-1168.

[12] 谭小辉,万旺根,黄炳,等. 基于 SPH 的三维流体模拟[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(12): 222-224, 258.

[13] BENDER J, KOSCHIER D. Divergence-free smoothed particle hydrodynamics [C]//Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Los Angeles: ACM, 2015: 147-155.

[14] MACKLIN M, MÜLLER M. Position based fluids [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013, 32(4): 1041-1045.

[15] 陈曦,王章野,何戡,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, 22(3): 396-405.

本文编辑:陈小平