

8-14-2020

Lattice Boltzmann Fluid Simulation Based on Parameters

Zhongxiao Guo

1. Institute of Water Resources for Pastoral Areas, Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China;;

Huiwen Liu

1. Institute of Water Resources for Pastoral Areas, Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China;;2. North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;;

Xuemei Liu

2. North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;;

Gao Yang

3. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Lattice Boltzmann Fluid Simulation Based on Parameters

Abstract

Abstract: In computational fluid dynamics (CFD), the lattice Boltzmann Method (LBM) has become the mainstream method of fluid numerical simulation based on Navier-Stokes equations. The visualization of numerical results and the real-time rendering of fluid animation could provide a visual method for data analysis. *A velocity field drawn method for two-dimensional visualization was proposed based on LBGK equation and D2Q9 model design algorithm model, transforming floating-point fluid velocity value into the intensity values, which was used by the RGBA color rendering method. For three-dimensional visualization, Particle Level Set Method (PLSM) was used to track the fluid surface and coupled it with LBM algorithm.* Through the simulation instances, the results show the method is simple, real-time, and the fluid animation is vivid and accurate.

Keywords

LBM method, fluid visualization, parameters, fluid data normalized

Recommended Citation

Guo Zhongxiao, Liu Huiwen, Liu Xuemei, Gao Yang. Lattice Boltzmann Fluid Simulation Based on Parameters[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2054-2061.

基于格子 Boltzmann 的参数化流体仿真

郭中小¹, 刘慧文^{1,2}, 刘雪梅², 高阳³

(1. 中国水利水电科学研究院水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 华北水利水电大学, 郑州 450011;
3. 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191)

摘要: 格子 Boltzmann(LBM)方法已成为处理介于宏观与微观之间介观流体问题的有效数值方法对 LBM 方法的数值计算结果进行可视化, 实时绘制成流体动画, 以便从形象直观的角度进一步进行数据分析。针对二维 LBM 可视化方法, 基于 LBGK 方程和 D2Q9 模型设计算法模型, 提出了一种通过指标标准化, 将浮点型流体速度值进行归一化处理, 转化为 RGBA 颜色模式的强度值的速度场绘制方法。针对三维可视化方法, 引入粒子水平集方法(Particle Level Set Method, PLSM)对 LBM 流体的液面进行追踪, 并设计了 LBM 与 PLSM 间的耦合算法。结果表明, 所提出的流体可视化仿真方法正确有效, 流体动画效果清晰、准确。

关键词: LBM 方法; 流体仿真; 流体可视化; PLSM

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 09-2054-08

Lattice Boltzmann Fluid Simulation Based on Parameters

Guo Zhongxiao¹, Liu Huiwen^{1,2}, Liu Xuemei², Gao Yang³

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Areas, Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China; 2. North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;
3. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In computational fluid dynamics (CFD), the lattice Boltzmann Method (LBM) has become the mainstream method of fluid numerical simulation based on Navier-Stokes equations. The visualization of numerical results and the real-time rendering of fluid animation could provide a visual method for data analysis. A velocity field drawn method for two-dimensional visualization was proposed based on LBGK equation and D2Q9 model design algorithm model, transforming floating-point fluid velocity value into the intensity values, which was used by the RGBA color rendering method. For three-dimensional visualization, Particle Level Set Method (PLSM) was used to track the fluid surface and coupled it with LBM algorithm. Through the simulation instances, the results show the method is simple, real-time, and the fluid animation is vivid and accurate.

Keywords: LBM method; fluid visualization; parameters; fluid data normalized

引言

在流体的数值计算和计算机图形学领域, 如何



收稿日期: 2015-06-13 修回日期: 2015-07-30;
基金项目: 央分成水资源费项目(1261430122054);
作者简介: 郭中小(1958-), 男, 内蒙古呼和浩特, 硕士, 教高, 研究方向为水文及水资源; 刘慧文(1990-), 女, 河南濮阳, 硕士生, 研究方向为水文及水资源。

生动、实时地对流体数值计算结果进行可视化模拟一直是计算机图形学中一个重要课题。

基于物理的流体仿真主要集中在计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)领域, 主要研究的是流体运动的科学求解, 用 Navier-Stokes 方程(N-S 方程)或其简化形式精确求解流体运动, 从而揭示流体运动的内在规律, 解

决流体相关领域的工程计算问题。如今已发展了大量高精度高效率的数值方法,并在工程领域进行了大量的应用,发展出了像 Fluent, CFX, Ansys 这样的商用软件来专门做流体的分析计算。格子 Boltzmann 方法(LBM)作为经典的流体计算方法,具有计算精度高,边界条件易处理,并行性好的优点,在 CFD 领域具有广泛的应用,而在计算机图形学领域的研究相对较少,本文主要关注 LBM 在计算机图形学方面的可视化工作。

在 LBM 流体绘制工作中,文献[1-2]提出了一个可拓展的 LBM 构架用于地理系统的流体仿真,具有参数可控,可扩展性强,应用范围广的优点,其计算过程和可视化模拟分别在两个程序中实现,先进行数值计算,然后通过读入计算结果进行可视化显示。文献[3]开发了一个利用 OpenGL 图形用户接口实现 LBM 可视化的交互软件,计算数据可动态显示,但动画颜色过渡突兀,成像效果模糊,难以辨别低速流场。

为弥补单纯用 LBM 方法进行流体仿真的不足, Nils Thürey^[4]等人用浅水方程(Shallow Water Equation)结合 LBM 方法实现了自由表面的流体动画,仿真效果生动真实,但渲染过程耗费了大量时间资源; Frank Lossasso^[5]用 SPH 方法模拟流体,用水平集方法(Level Set)模拟流体表面,实现了流体与灯塔的交互,并成功实现了浪花的渲染,但真实感有待增强; Chang-bo Wang^[6]等人将 LBM 方法、SPH 方法和水平集方法相结合,成功模拟了增强细节的大尺度自由表面流体,既节省计算资源,又注重了如泡沫飞溅、气泡和浪花等大尺度流体的细节渲染。

本文利用 OpenGL 图形用户接口和 Visual C++ 进行 LBM 可视化仿真。算法内核依照 LBGK 模型,在二维流体动画绘制方面,提出了一种图形学方法,将流体速度值进行归一化处理,再通过阈值进行过滤和加权放缩,转化为 OpenGL 可直接识别的无量纲 RGBA 颜色强度值,改进和增强了了可视化效果。在三维流体绘制方面,用 PLSM 对

LBM 流体进行液面追踪,提出了 LBM 向 PLSM 传递数据的耦合算法,保证了网格模型的鲁棒性,实现了自由流体液面的准确追踪与绘制。

1 二维 LBM 方法

LBM 方法具有介观特性,其优点是物理图像清晰,边界条件容易处理,具有天然的并行性。在科研领域, LBM 方法已经成为一个非常活跃的模拟手段,并迅速在众多流体领域得到应用。本文提出的 LBM 可视化仿真基于 LBGK 方程和 DnQm 模型开发。

1.1 DnQm 模型

1992 年, Qian 等人提出的 DnQm(n 维空间, m 个离散速度)系列模型是 LBM 方法的基本模型^[7]。

DnQm 模型的平衡态分布函数如下:

$$f_{\alpha}^{eq} = \rho \omega_{\alpha} \left[1 + \frac{\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u})^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right] \quad (1)$$

式中: c_s 为格子声速; ω_{α} 为权系数。

不同模型的平衡态分布函数中权系数 ω 和格子声速 c 也不同。图 1 是几个常见的 DnQm 模型。

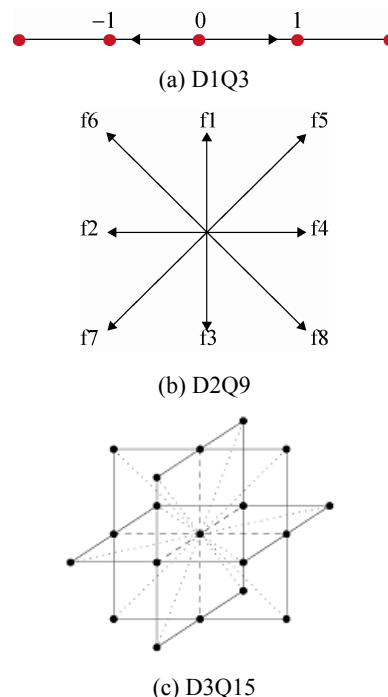


图 1 几种 LBGK 物理模型

列出这些模型的参数配置:

$$D1Q3: c = [0, 1, 1], c_s = \frac{c}{\sqrt{3}}, \omega_i = \begin{cases} 2/3, c_i^2 = 0 \\ 1/3, c_i^2 = c^2 \end{cases}$$

D2Q9:

$$c = c \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$c_s = \frac{c}{\sqrt{3}}, \omega_i = \begin{cases} 4/9, c_i^2 = 0 \\ 1/9, c_i^2 = c^2 \\ 1/36, c_i^2 = 2c^2 \end{cases}$$

D3Q15:

$$c = c \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$c_s = \frac{c}{\sqrt{3}}, \omega_i = \begin{cases} 2/9, c_i^2 = 0 \\ 1/9, c_i^2 = c^2 \\ 1/72, c_i^2 = 3c^2 \end{cases}$$

D3Q19:

$$c = c \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$c_s = \frac{c}{\sqrt{3}}, \omega_i = \begin{cases} 1/3, c_i^2 = 0 \\ 1/18, c_i^2 = c^2 \\ 1/36, c_i^2 = 2c^2 \end{cases}$$

以上几种模型中, 一维模型应用较少, 二维模型 D2Q9 和三维模型 D3Q15、D3Q19 应用较多。D2Q9 模型在消耗较少计算资源和更少内存的前提下验证算法的有效性和正确性, 两个三维模型用于进行数值计算时能够还原三维世界的真实流体属性。

1.2 LBGK 方程

系统中流体演进遵循消除外力项的 LBGK 方程

$$f_\alpha(\mathbf{r} + \mathbf{e}_\alpha \delta_t, t + \delta_t) - f_\alpha(\mathbf{r}, t) =$$

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{1}{\tau} [f_\alpha(\mathbf{r}, t) - f_\alpha^{eq}(\mathbf{r}, t)] \quad (2)$$

式中, $\tau = \frac{\nu}{c_s^2 \delta_t} + \frac{1}{2}$; ν 为流体的运动粘度; Re 为 Reynolds 数, 与流场尺寸, 流体速度和运动粘度有关, $Re = \frac{LU}{\nu}$, L 为方格的 s 高度, U 为流体速度。平衡态分布函数采用式(1)确定, 格子声速 c_s 取 $1/\sqrt{3}$ 。边界条件采用非平衡外推格式^[8]。

2 二维流体仿真

2.1 RGBA 模式

OpenGL 提供两种颜色模式——RGBA 模式和颜色索引模式。在 RGBA 模式下, 硬件为 R、G、B 成分保留一定数量的位平面(A 表示 alpha 值, 对屏幕颜色显示没有直接效果), 每种成分的位平面数量并不一定相同, 如图 2 所示。

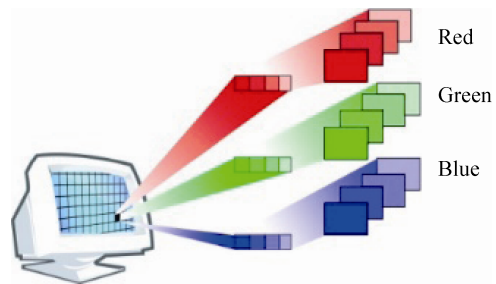


图 2 来自位平面的 RGB 值

R、G 和 B 值一般以整数而不是浮点数的形式存储, 并且根据可用的位数缩放, 以便存储和提取。RGBA 模式中使用的颜色设置函数原型为:

```
Void glColor3f (GLfloat red, GLfloat green,
                GLfloat blue)
```

其中参数 red, green 和 blue 接受 0.0 到 1.0 的浮点数据类型。因此, 位平面中的 256 位真彩色将对应于 RGBA 模式中 $0/255 = 0.0, 1/255, \dots, 255/255 = 1.0$ 的值, 不管位平面数量是多少, 0.0 总是表示最低强度, 1.0 总是表示最高强度。

2.2 流体绘制方法

真实流体速度变化范围大, 且流体速度为矢量值, 难以直接转化为可用于计算机绘制图像的像素值。在计算机图形学领域, 传统的思路是首先求得流体速率, 即速度的模, 然后乘以权系数使之达到图形学绘制范围, 进而通过不同像素值的颜色信息表示流体速度的快慢。但此方法存在一个显著的缺点: 权系数的选择难以把握。例如, 对于流体速度变化范围较大的同一流场, 选择小权系数可以使高速流场绘制清晰, 但低速流场颜色显示就会不明显; 选择大权系数可以保证低速流场绘制准确, 但是容易造成高速流场内数据溢出。

针对上述问题, 提出了一种新的流体绘制方法。方法基于 OpenGL 颜色表示模式中的 RGBA 模式, 依据指标标准理论, 将浮点型流体速度先进行归一化处理, 使之转化为 RGBA 颜色模式的强度数据, 再通过阈值划分不同数据区间, 各区间进行不同的加权放缩。具体绘制方法为: 首先, 图像处理单元接收流场内节点数据, 读取速度信息, 即 x 方向和 y 方向的速度分量。然后求各节点速率, 将矢量速度转化为无量纲的数值信息, 并进行线性归一化, 公式如下:

$$\frac{(\sqrt{u_x^2 + u_y^2} - u_{\min})}{u_{\max} - u_{\min}} \quad (3)$$

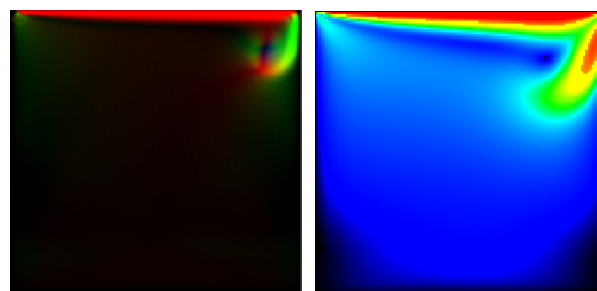
其中 u_x 和 u_y 为速度在 x 、 y 方向上的分量。 u_{\max} 为速率最大值, 即驱动流速率 $|U|$ 。 u_{\min} 为速率最小值, 这里最小速率为 0。归一化处理后, 值域为 $[0.0, 1.0]$, 归一化处理后, 值域为 $[0.0, 1.0]$, 此时值域已经完全吻合 RGBA 模式中颜色强度的参数区间, 保证了数据不会溢出。接下来, 根据设定的初始速度确定阈值, 通过阈值过滤数据, 将数据划分若干个子区间。用 R、G、B 和混合强度值分别标记这些区间, 最低值区间用蓝色标记, 最高值区间用红色标记, 其余区间根据阈值不同对应不同的颜色。最后, 对每个区间乘以不同权系数, 低速区间乘以大权系数放大数据值以

突出颜色强度, 高速区间乘以小权系数缩小数据值以避免数据溢出, 优化显示效果。

2.3 仿真结果

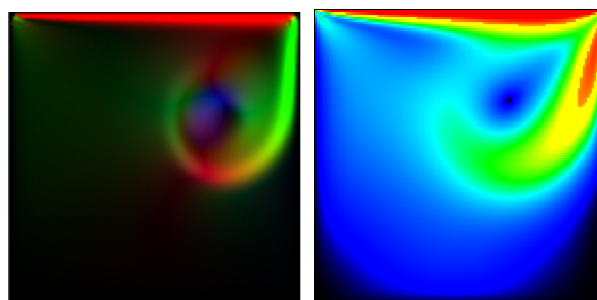
2.3.1 方腔流

以二维方腔流作为算例验证本文核心算法和绘制方法的正确性。在方腔中, 不可压缩流体被一个正方形围栏限制, 上边界以一个恒定速度水平右移。以初始密度=1.0, 驱动速度 $U=0.2$, 网格尺寸 128×128 , 雷诺系数 $Re=400$ 为例, 本文与文献[3]在第 700 和第 2 700 步时成像效果的对比如图 3 和图 4 所示。图 5 为速度场对应的色值表, 其中数值代表流体速度(m/s)。



(a) 文献[3]的成像 (b) 采用方法成像

图 3 700 步时方腔流成像效果对比



(a) 文献[3]的成像 (b) 采用方法的成像

图 4 2700 步时方腔流成像效果对比

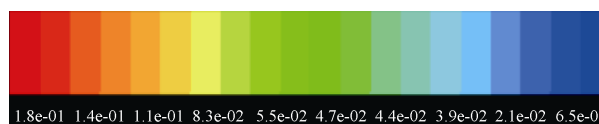


图 5 色值表

从图 3、图 4 可以对比看出, 本文成像效果更清晰, 颜色过渡平滑, 各速度流场都可在图中清楚

地显示。

以初始密度=1.0, 驱动速度 $U=0.2$, 网格尺寸 256×256 , 雷诺系数 $Re=1\ 000$ 为例, 流场稳定后, 本方法最终成像效果图 6 所示。

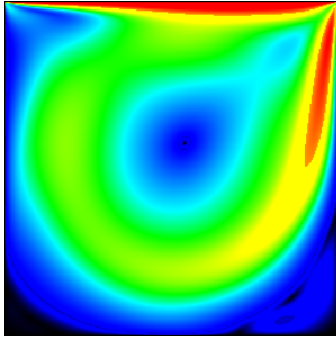


图 6 最终成像效果

为量化仿真结果, 测试方腔中央一级涡旋以及左右下角附近的两个二级涡旋位置, 并与文献[9]中数据对比, 结果如表 1 所示。从图像可以看出拟合效果良好, 表中数据表明仿真结果与文献[9]误差较小, 说明该方法正确、有效的。

表 1 方腔流涡旋位置

涡旋位置	一级涡旋		左下涡旋		右下涡旋	
	x	y	x	y	x	y
本文	0.5427	0.5665	0.0716	0.0785	0.8635	0.1111
文献[9]	0.5438	0.5625	0.0750	0.0813	0.8625	0.1063
误差	0.0020	0.0071	0.0450	0.0344	0.0012	0.0451

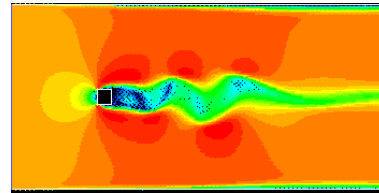
2.3.2 方柱绕流

流体仿真软件 Fluent 是目前国际上比较流行的商用 CFD 软件, 模拟结果准确权威。利用本系统模拟方柱绕流, 并与相同条件下 FLUENT 模拟结果进行对比已验证流体仿真算法和绘制方法的正确性。

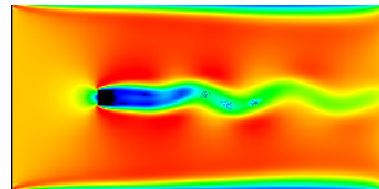
流场中存在一个固体方柱, 流体以恒定速度流入流场左侧边界, 由右侧边界流出。流场尺寸设定为 256×128 , 流速为 0.1, 方柱尺寸为 10×10 , 方柱中心位于 128×64 处。流场稳定后, 本文方法成像与 FLUENT 成像对比如图 7 所示。图 8 为色值表。

商用软件 FLUENT 源代码并不开源, 核心算法为有限容积法 FVM, 流场绘制方法未知, 本系统采

用的是基于 LBGK 方程和 D2Q9 模型的 LBM 方法, 通过对比本文方法与 FLUENT 成像效果可以看出, 本文流体动画的绘制效果清晰生动, 与 FLUENT 绘制效果接近, 流场各区域特征相符。说明系统算法内核正确, 流体动画绘制方法生动有效。



(a) FLUENT 成像



(b) 本文成像

图 7 FLUENT 成像与本文成像效果对比

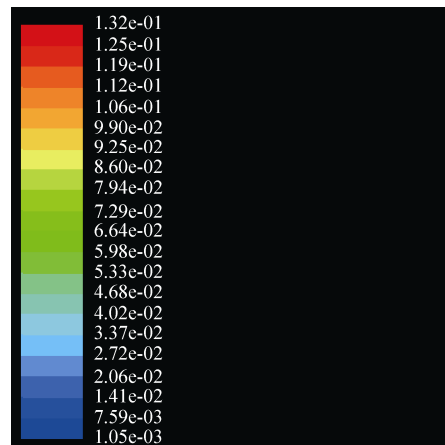


图 8 图 7 的色值表

3 三维流体仿真

利用 LBM 方法求解三维流体仿真问题时, 表面追踪会对其精度和视觉效果造成比较大的影响。为了避免 LBM 基于网格思想难以表达细节的缺陷, 一些与拉格朗日方法结合的混合方法得到了研究^[10]。文献[11]结合了拉格朗日粒子法与水平集方法, 提出一种新的方法, 称为“粒子水平集方法”(Particle Level Set), 此方法利用水平集函数表

示流体, 利用欧拉法求解对流项, 而在水平集表示界面的两侧增加粒子, 借助粒子的水平对流修正水平集的边界, 发挥了两者的优点^[12]。

3.1 PLSM 与 LBM 耦合算法

为实现 LBM 与 PLSM 模型结合后算法的正确耦合, 需要对 LBM 的算法形式加以变换, 本文中, 应用半拉格朗日对流项^[13]传递速度参数。半拉格朗日方法的基本思想是: 已知给定的 Level Set 方程和速度场 \mathbf{u} , 格点 \mathbf{x} 处的速度每 Δt 时间进行一次更新:

$$\phi(\mathbf{x}) = \phi(\mathbf{x} - \mathbf{u}(\mathbf{x})\Delta t) \quad (4)$$

在液面跟踪过程中, 具有流体属性的流体网格用 LBM 算法进行计算, 没有流体的空网格所有节点处属性置零, 因为只需对液面网格的算法进行改进即可。液面网格的演进过程遵照 LBM 演进规则, 碰撞过程按照如下方程进行修正^[14]:

$$f'_i(\mathbf{x}, t + \Delta t) = f_i^{eq}(\rho_A, \mathbf{u}) + f_i^{eq}(\rho_A, \mathbf{u}) - f_i(\mathbf{x}, t) \quad (5)$$

\mathbf{x} 表示液面网格, i 是液面网格相邻的气体网格方向, \tilde{i} 与 i 方向相反, ρ_A 是密度, \mathbf{u} 是 \mathbf{x} 处的速度。为保证液面两边的势能守恒, 由液面法向确定的分布函数也需重建^[15]。因为流体液面以外为空气, 不具备流体属性, 故在本文中将空气节点处平衡态分布函数置零, 式(5)就变成:

$$f'_i(\mathbf{x}, t + \Delta t) = -f_{\tilde{i}}(\mathbf{x}, t) \quad (6)$$

方向为 $n \cdot \mathbf{e}_{\tilde{i}} > 0, n = \nabla\phi / |\nabla\phi|$ 。

以水滴模拟为例, 在 LBM 网格区域内受到外力作用发生形变, 原始网格模型图如图 9 所示。

接着, 利用 PLSM 追踪网格模型边界, 黑色曲线表示修正后的边界, 边界内部和外部为补偿的粒子的区域范围, 效果如图 10 所示。

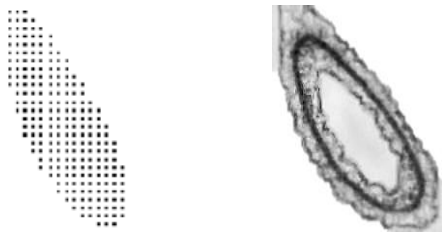


图 9 LBM 初始化网格模型

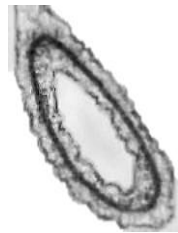
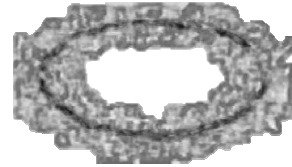


图 10 PLSM 追踪边界

当模型发生形变时, 由 PLSM 追踪网格模型边界的效果如图 11 所示。



(a) 形变后丧失尖锐细节的网格模型



(b) PLSM 追踪后还原的模型

图 11 形变后模型示意图

由图 11(a)可以看出, 发生形变后, 网格模型已经在上边界发生局部失真, 图 11(b)中, PLSM 可以准确的跟踪水滴模型的边界, 通过补偿粒子的方式对模型进行修正, 还原了模型细节。

3.2 仿真结果

设计水流自由落体模型进行算法验证。水流下落过程中形变明显, 空间位置改变较大, 其形状和位置相对于缓速流动流体变得难以追踪, 因此对 PLSM 追踪 LBM 液面的有效性验证具有重要意义。

实验采用 Visual Studio 2010 开发环境, 通过 C++ 语言编程实现, 图形绘制依托 OpenGL 图形用户接口库。

1) 在空间场内划分 LBM 求解网格区域, 标准大气压下纯水在 0°C 表面张力 σ 为 $75.6 \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

2) 在流场中心上方初始化圆柱形流体网格, 流体受外力影响(重力)下落, 同时源节点处流体不断填充。

3) 每个 LBM 时间步长后, PLSM 方法追踪流体表面。初始时效果如图 12 所示。

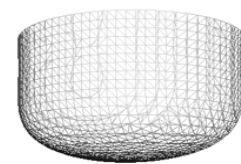


图 12 PLSM 液面追踪效果

4) 运用快速行进算法 (Fast Marching Method, FMM) 对 PLSM 追踪出来的网格进行遍历, 并用三角面片填充, 如图 13 所示。



图 13 FMM 填充效果

5) 导入 obj 网格模型作为边界, 边界点处理采用非平衡外推格式。

仿真结果在 Autodesk maya 中进行渲染, 如图 14 所示。算法效率大致在 54.0-55.0 F/S 之间, 远大于人体对动画的识别度 24 F/S, 因此本仿真结果可以满足流体动画的制作要求。



图 14 水流下落过程仿真

图 15 中横轴代表时间步, 纵轴代表帧率。由表可知, 随着水滴形变、破裂、下落的过程, 算法复杂度增加, 算法效率有所下降, 但整体算法帧率波动不大, 对算法效率的影响可以忽略不计, 因此可判断本方法是稳定、可靠的。

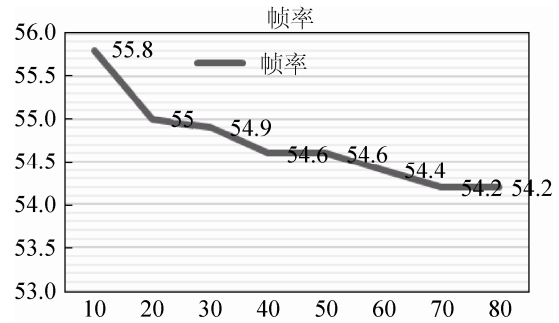


图 15 帧率趋向表

4 结论

本文对 LBM 方法的数值计算结果可视化进行研究, 在二维和三维流场内绘制流体动画。针对二维 LBM 可视化方法, 提出了一种通过指标标准化, 将浮点型流体速度值进行归一化处理, 转化为 RGBA 颜色模式的强度值的速度场绘制方法, 使得从形象直观的角度便于进行数据分析。针对三维可视化方法, 引入 PLSM 对 LBM 流体的液面进行追踪, 并设计了 LBM 与 PLSM 间的耦合算法, 在确保正确计算流体数据的同时实现了流体的逼真绘制。可视化结果表明仿真效果生动、真实, 数据分析表明本文方法正确、有效。

参考文献:

- [1] E W Llewellyn. LBflow: An Extensible Lattice Boltzmann Framework for the Simulation of Geophysical Flows. Part I: Theory and Implementation [J]. Computer & Geosciences (S0098-3004), 2010, 36(2): 115-122.
- [2] E W Llewellyn. LBflow: An Extensible Lattice Boltzmann Framework for the Simulation of Geophysical Flows. Part II: Usage and Validation [J]. Computer & Geosciences (S0098-3004), 2010, 36(2): 123-132.
- [3] Mayworm J G, Judice S F, Giraldo G A. Computational System for Visualization and Lattice Boltzmann Fluid Simulation [D]. Brazil: National Laboratory for Scientific Computing, 2012.
- [4] Thürey N, Rüdiger 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. Switzerland: Eurographics Association Aire-la-Ville, 2006: 157-164.

- [5] Losasso F, Jerry O T, Nipun Kwatra, et al. Two-way coupled SPH and particle level set fluid simulation [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (S1077-2626), 2008, 14(4): 797-804.
- [6] Wang C B, Zhang Q, Kong F L, et al. Hybrid Particle-grid Fluid Animation with Enhanced Details [J]. *The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics* (S0178-2789), 2013, 29(9):937-947.
- [7] Qian Y H, d'Humieres D, Lallemand P. Lattice BGK Models for Navier-Stokes Equation [J]. *Europhysics Letters* (S0295-5075), 1992, 17(6): 479-484.
- [8] Li L, Mei R, Klausner J F. Boundary Conditions for Thermal Lattice Boltzmann Equation Method [J]. *Journal of Computational Physics* (S0021-9991), 2013, 237(15): 366-395.
- [9] 何雅玲, 王勇, 李庆. 格子 Boltzmann 方法的理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 4-5.
- [10] Foster N, Fedkiw R. Practical animation of liquids [C]// *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, USA: ACM, 2001: 23-30.
- [11] Enright D, Marschner S, Andfedkiw R. Animation and Rendering of Complex Water Surfaces [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH* (S0730-0301), 2002, 21(3): 736-744.
- [12] Kang N, Sagong D. Incompressible SPH using the Divergence - Free Condition [J]. *Computer Graphics Forum* (S1467-8659), 2014, 33(7): 219-228.
- [13] Zhao Y, Yuan Z, Chen F. Enhancing fluid animation with adaptive, controllable and intermittent turbulence [C]// *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on computer animation*. Switzerland: Eurographics Association Aire-la-Ville, 2010: 75-84.
- [14] Thurey N, Rude U. Free Surface Lattice-Boltzmann Fluid Simulations with and without Level Sets [C]// *Proceedings of Workshop on Vision, Modeling and Visualization*. California, USA: Oxford University Press, 2004: 199-207.
- [15] Wojtan C, Müller-Fischer M, Brochu T. Liquid Simulation with Mesh-based Surface Tracking [C]// *ACM SIGGRAPH 2011 Courses*. New York, USA: ACM, 2011.

(上接第 2053 页)

- [5] Eilemann S, Makhinya M, Pajarola R. Equalizer: A Scalable Parallel Rendering Framework [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*: (S1077-2626), 2009, 15(3): 436-452.
- [6] Peng H, Xiong H, Shi J. Parallel-SG: research of parallel graphics rendering system on PC-Cluster [C]// *Proceedings of the 2006 ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications*. New York, USA: ACM Press, 2006: 27-33
- [7] 殷萍. Terrain-VDR: 基于 Out-of-Core 的交互式地形并行绘制框架 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [8] 陈学亮. 基于多核平台优化的 OGRE 3D 渲染引擎 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [9] 王攀, 刘华海, 李思昆, 等. 无合成并行绘制算法中的自适应屏幕分割策略 [J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(1): 99-103.
- [10] 刘华海, 王攀, 蔡勋, 等. 面向多核 CPU 多 GPU 的节点内并行混合绘制模型 [J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(1): 94-98.
- [11] 谈敦铭, 赵罡. 面向装配的飞行器超大模型实时可视化技术 [J]. *计算机辅助设计与图形学报*, 2012, 24(5): 590-597.