

◎博士论坛◎

# 流体动画方法综述

王晓华<sup>1</sup>, 张田文<sup>1</sup>, 柴旭东<sup>2</sup>WANG Xiao-hua<sup>1</sup>, ZHANG Tian-wen<sup>1</sup>, CHAI Xu-dong<sup>2</sup>

1. 哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001

2. 北京仿真中心, 北京 100854

1. School of Computer Science &amp; Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China

E-mail: wangxh1101@yahoo.com.cn

WANG Xiao-hua, ZHANG Tian-wen, CHAI Xu-dong. Survey of fluid animation. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(2): 1-4.

**Abstract:** The fluid animation, including 2-D and 3-D fluid animation, is introduced in this paper. The process of fluid animation producing can be divided into two steps including fluid surface modeling and fluid rendering. 2-D fluid modeling mainly adopts the parametric modeling method based on Fourier transform to compose the fluctuant 2-D fluid surface. 3-D fluid modeling mainly bases on the Navier-Stokes fluid equation and uses the internal rate of the fluid to establish the equation of fluid surface. Fluid rendering mainly adopts ray-tracing method. The challenges and future works of fluid animation may include the fluid animation control, real-time rendering, detail exhibiting and so on.

**Key words:** fluid animation; computational fluid dynamics; natural phenomena simulation

**摘要:**介绍了二维流体和三维流体动画方法。流体动画制作分为两步:流体表面建模和流体绘制。二维流体建模主要采用参数建模方法,基于傅立叶变换原理,合成波动的二维流体表面。三维流体建模一般基于 Navier-Stokes 流体方程,利用流体内部的速度建立流体表面的方程。流体绘制主要采用光线跟踪方法。流体动画的挑战和发展方向在于:流体动画控制、实时绘制、细节表现。

**关键词:**流体动画;计算流体力学;自然现象模拟

**文章编号:**1002-8331(2008)02-0001-04 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP391.9

## 1 引言

在电影、动画和视景仿真等领域,经常要绘制流体流动的过程,如:动态波动的海面、飞溅的浪花、向杯中倒入牛奶等。流体的运动过程非常复杂,真实地绘制各种流体的流动过程具有较大的挑战性,流体动画方法成为计算机图形学领域的一个研究热点。

流体的含义较为广泛,包括:气体、液体,以及多相流和混合流等,本文主要介绍水的动画方法。流体动画分为流体表面建模和绘制两个步骤。流体表面建模完成后,一般采用光线跟踪方法绘制具有较强真实感的光源照射效果。

从几何建模角度划分,流体动画方法可分为两类:二维流体动画和三维流体动画。二维流体动画只需绘制一个二维的流体表面,不需考虑流体的体数据。如:视景仿真中,海面一般认为是一个二维曲面,贴上海面的纹理显示海上场景。二维流体的表面建模主要根据海浪的频谱,利用傅立叶变换方法,合成多种频率的正弦波(或余弦波)生成流体表面<sup>[1]</sup>。其中的关键在

于如何获得海浪的频谱。三维流体动画需要建立流体的三维表面模型。三维流体的表面建模比较复杂,主要根据 Navier-Stokes 流体动力学方程描述流体内部速度和压力的变化。利用有限差分方法解 Navier-Stokes 偏微分方程组,计算流体内部各点速度,再通过 Level Set 等方法,利用流体内部的速度建立三维流体表面的方程。

## 2 二维流体表面建模

二维流体的表面建模主要指海面的建模和绘制。海面建模利用傅立叶变换方法,根据海浪的频谱,合成多种频率的正弦波(或余弦波)生成流体表面。

### 2.1 海面参数建模

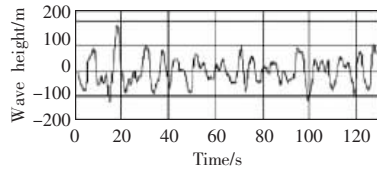
海面可认为是一个二维曲面,根据傅立叶变换原理,任一连续或包含有限个间断点的函数可认为是一系列不同振幅、频率、相位的正弦波(或余弦波)的叠加<sup>[2]</sup>。

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2004AA104330)。

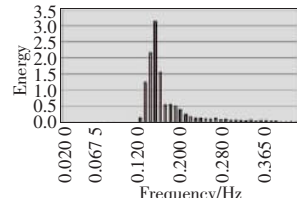
**作者简介:**王晓华(1971-),博士生,主要研究方向:视景仿真、虚拟样机和网格计算;张田文(1940-),教授,博士生导师,主要研究方向:图像处理、计算机视觉;柴旭东(1968-),博士,研究员,主要研究方向:虚拟样机、CIMS 和仿真网格。



(a) 测量海浪波动的浮子



(b) 浮子测量海浪高度记录



(c) 无方向性海浪频谱

图1 利用海浪浮子测量海浪频谱示意

$$h(x, y, t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(k_i(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \omega_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

正弦波的振幅、频率、相位叫做这个函数的频谱。 $A_i$ 是振幅,  $\omega_i = 2\pi f_i$ 是角频率,  $\lambda_i$ 是波长,  $k_i$ 是正弦波的序号,  $\theta_i$ 是在  $xy$  水平面上的传播方向,  $\varphi_i$ 是相位。

## 2.2 海浪频谱生成

如何获得海浪的频谱是海面建模的关键问题之一。目前有两种方法:(1)利用海面浮子记录海面的波动位移,经过傅立叶变换生成海浪频谱。(2)对拍摄的海面照片进行傅立叶变换生成海浪频谱。

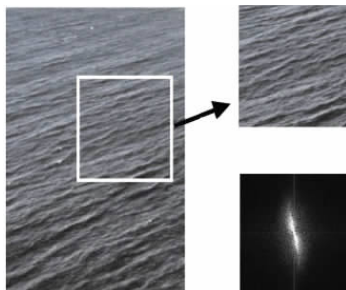
### (1) 利用海面浮子生成频谱

利用海面真实测量数据,浮子定点漂浮在海面上,通过一个加速度计记录垂直位移。浮子利用内部的微处理器作一维快速傅立叶变换(FFT),得到一维无方向性的频谱<sup>[9]</sup>,如图1所示。

### (2) 利用图象生成频谱

根据海面照片自动生成频谱。海面照片应满足2项要求:

①视角尽量垂直向下。②拍摄应在多云天气,光照均匀,海面没有明显反光。二维数字图像可看做多行的一维数据,可进行二维快速傅立叶变换,得到二维频谱。特点:中心化后的二维频谱中每个点代表一个正弦波,振幅为函数值,距中心的半径是频率,垂直半径的方向是传播方向。如图2所示。二维傅立叶变换原理是先做行变换,再做列变换,交换顺序也可。



(a) 海浪照片 (b) 海浪的傅立叶频谱

图2 利用海浪照片生成海浪频谱

主要步骤:

- (1) 二维傅立叶变换,根据海面照片得到海浪频谱。
- (2) 频谱采样:为减小计算量,将频谱作非均匀区间划分,采集能量集中的点(振幅较大),提高计算效率。
- (3) 克服重复模式:为克服正弦波合成后画面中的重复模式,加入湍流函数项。

## 3 三维流体表面建模

### 3.1 三维流体表面描述的基本原理

流体力学方程描述流体内部的速度、压力的变化。利用有

限差分方法和半拉格朗日方法<sup>[9]</sup>,解 Navier-Stokes 方程偏微分方程组,更新流体内部各点的运动速度<sup>[4,5]</sup>。通过 Level Set 等方法,利用流体内部的速度建立三维流体表面的方程。Navier-Stokes 方程描述流体的运动包括两部分<sup>[6]</sup>:

(1) 质量守恒:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (2)$$

(2) 动量守恒:

$$u_i = v \cdot \nabla (\nabla u) - (u \cdot \nabla) u - \frac{1}{\rho} \nabla p + g \quad (3)$$

### 3.2 工作过程

计算步骤:

(1) 建立计算网格。

(2) 利用粒子和隐含表面结合的方法建模流体体积。以下为循环,每个时间步长循环一次。

(3) 使用有限差分方法和半拉格朗日方法更新流体速度场。

(4) 利用方程  $\nabla \cdot V = 0$  保持质量守恒(不可压缩性)。

(5) 利用新的速度场更新流体的位置。

### 3.3 Level Set 方法

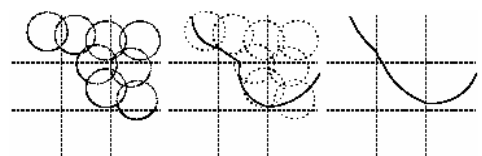
为了描述物体表面的动态拓扑变化,将物体表面用一个更高维的平滑函数  $\phi(x, t)$  包裹起来,这个 Level Set 函数  $\phi(x, t)$  性质如下<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} \phi(x, t) < 0, x \in \Omega \\ \phi(x, t) > 0, x \notin \Omega \\ \phi(x, t) = 0, x \in \partial\Omega = \Gamma(t) \end{aligned} \quad (4)$$

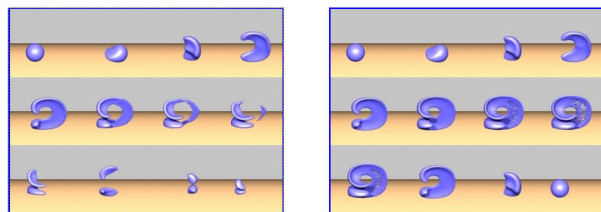
表面函数随时间的变化由水平对流方程决定,即流体的速度决定流体的表面:  $\frac{\partial \phi}{\partial t} + V \cdot \nabla \phi = 0$ 。

### 3.4 Particle Level Set 方法

粒子方法用于描述三维流体表面的细节。粒子具有一定的半径,多个相邻的粒子的圆周连接起来,经过平滑处理可描述一条曲线,见图3。粒子的运动速度直接根据流体的速度场利用3维线性插值计算,粒子的位置决定于  $dx_p/dt = V_x$ 。粒子计算费用较低,可使流体速度场的积分更平滑。三维流体表面建模可以采用粒子和 Level Set 相结合的表面描述方法,Level Set 方法描述表面的平滑整体,粒子方法描述三维流体表面的细节。

图3 对应于粒子附近隐函数、插值后的  $\phi$  值及平滑后的  $\phi$  值等的流体表面边界示意图

当流体变成较细小的形态,如飞溅的水珠等时,Level Set 方法会造成一定的流体质量的流失,见图4。



(a)Level Set 导致流体体积损失 (b)Particle Level Set 保持流体体积

图4 Particle Level Set 和 Level Set 方法对于流体体积的影响

过量的扩散会造成正粒子,这种现象可用来指示发生一阶误差。粒子的半径定义了 Level Set 函数,正粒子终止于  $\phi < 0$  的区域。随着正粒子向  $\phi < 0$  的区域运动,  $\phi$  趋向于 0,流体表面恢复原状<sup>[8]</sup>。

主要步骤:

在每个时间推进步长,用前向差分方法计算粒子(位置和速度)和 Level Set 函数。根据 Level Set 函数值决定如何处理粒子。

(1)粒子只需靠近流体表面,不需充满整个流体,因此流体内部离流体表面较远的粒子将被删除。

(2)流体表面的曲率:  $k = \nabla \cdot (\nabla \phi / |\nabla \phi|)$ 。表面平滑的区域曲率较小,这一区域的粒子将被忽略,以保持表面的平滑。流体飞溅的区域,曲率较大,需要粒子强调流体的细节,增加边界的清晰度。在这一区域,允许粒子修改局部的流体表面(Level Set 函数)。

### 3.5 更新流体速度场

(1)使用 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)条件计算时间步长  $\Delta t < \Delta \tau / |u|$ ,以使计算收敛<sup>[4]</sup>。

(2)利用一阶半拉格朗日方法更新动量守恒方程中的对流项  $(u \cdot \nabla)u$ 。

(3)利用标准中心差分算法计算动量守恒方程中的黏性项  $v \cdot \nabla \cdot (\nabla u)$ 。

(4)计算

$$u_i = v \cdot \nabla \cdot (\nabla u) - (u \cdot \nabla)u - \frac{1}{\rho} \nabla p + g \quad (5)$$

### 3.6 三维流体动画控制

流体动画控制的难点在于基于物理模型的控制,需要解决表面自由变化、移动物体和流体之间的交互等问题<sup>[9]</sup>。Navier-Stokes 方程允许直接施加类似重力的作用力控制流体,但通过力的作用控制流体不直观。改进的办法是通过法线和物体移动方向的速度,设置计算网格任意点的速度,流体的速度决定了流体表面的形状和位置。该方法尽管还不能很完美地直接控制流体的运动,但通过控制速度场,能构成一个较为有效的动画工具。

## 4 流体绘制

目前,流体动画的图形绘制方法主要是光线跟踪方法。

### 4.1 光线跟踪的基本原理

根据 Whitted 整体光照明模型,景物表面每一可见点的光亮度由以下 3 部分组成:(1)由光源直接照射而引起的光亮度。(2)来自其它景物的入射光在景物表面产生的镜面反射光亮度。(3)来自其它景物的入射光在景物表面产生的规则透射光亮度。

从光源发出的光线有无数条,直接从光源出发对光线进行

跟踪非常困难。但实际上只有少数光线经由景物表面的反射和透射到达观察者的眼中,形成景物图像。因此,光线跟踪算法采用逆向跟踪技术<sup>[9]</sup>。

光线跟踪算法主要过程如下:

从视点出发,向图像平面每一像素中心发出一条光线,若光线与场景中景物无交,说明没有从光源发出的光线对此像素的亮度作贡献,跟踪结束。

否则,光线与景物有交,此时光线在离视点最近的景物表面交点处的走向,应依据当前交点的景物表面的情况:(1)理想漫反射面,跟踪结束。(2)理想镜面,沿镜面反射方向继续跟踪。(3)规则透射面,沿规则透射方向跟踪。多数情况是一条线分为两条:反射、透射光线。

上述过程是一递归过程,对每一光线的跟踪构成了一颗二叉树。终止条件一般有两种:(1)光线与景物没有交点;或者景物表面为漫反射面;或者跟踪层次超出用户设定的最大跟踪层数。(2)跟踪光线对像素亮度的贡献小于给定的阈值。

### 4.2 光线跟踪的加速方法

光线跟踪的加速方法主要有:包围盒技术、基于空间连贯性的空间剖分技术。

包围盒技术:用一个形状较简单的包围盒(球面、长方体等)将复杂景物包裹起来,求交光线先与包围盒进行求交测试,若相交再与复杂景物求交。由于光线与包围盒的求交相对简单,可以较小代价快速剔除与光线不相交的景物。

空间剖分技术:标准光线跟踪算法效率不高在于光线求交的盲目性,光线与每一景物求交,并且由于求交的无序性,求交后需对交点排序,找到沿跟踪方向最先遇到的第一交点。因此,光线与第一交点之后的其它景物求交是无价值的。考虑到景物在空间中有固定的方位,为减少求交的盲目性,可将景物空间剖分成网格。

## 5 研究发展方向

目前,流体动画的挑战与发展方向在于以下几个方面:(1)流体动画控制,为动画师提供更为直观和方便的流体控制方法,而不用关注流体的具体物理过程。(2)实时绘制,研究加速算法,减少网格数,以及基于物理加速器的硬件绘制。(3)细节表现。研究小尺度下的流动细节,实现更强真实感的细节表现,如飞溅的浪花等。另外,细节表现方面,目前关于多相流和混合流的研究在逐渐增多,成为一个新的研究热点。

### 5.1 流体动画控制

文献[5, 10]通过流体外部和内部的压强,以及流体速度实现流体控制,但仍然不够简单和直观。文献[11]提出一种方法,允许漫画师根据波浪库选择某一时刻的波浪形状,使用三维 Navier-Stokes 方程计算后续过程,可以获得较完整的波浪演化过程。文献[12]根据几何势能控制流体在一定的空间内,实现想要的形状。几何势能代替外部强制力量,漫画师指定的流体几何形状包含几何势能。这种形状控制没有给 Navier-Stokes 求解器增加更多的计算负载。文献[13]通过流体的压力阶跃突变控制流体,使流体自然地流入一个目标形状。文献[14]使用基于梯度的非线性优化方法控制流体,利用伴随矩阵高效计算导数。文献[15]扩展了 particle level set 方法,提出一种基于粒子的通用控制技术,使用流体变量,如:等值面、速度和黏性等控制流体。该方法可以为电影导演提供照片级流体动画效果,如:



终结者3中T-X机器人被粒子加速器吸附、熔化的情景。

## 5.2 实时绘制

文献[15]提出一种松耦合的多网格源(multiple grid sourcing)方法有效计算大规模流体的熔化、流出(down and out)行为,而不减少网格分辨率,或增加单个网格的计算时间。并提出一种移动网格窗方法,用于跟踪流体动画中仅与视觉相关的部分。文献[16]基于伽利略不变性和连续边界条件,采用自适应框架来追踪动态网格。文献[17]使用一种四面体网格跟踪边界变化,四面体网格每个时间步长变化,可以使计算集中在视觉重要的部分。文献[18]采用全三维 Navier-Stokes 自由表面求解器仿真水的顶部表面,克服传统二维高程方法在表现三维表面效果上的局限性。并且采用远离界面的地方粗糙网格的方法,提高绘制效率。文献[19]设计了一种无网格的数据结构,用于高效检测粒子和粒子碰撞。提出一种从粒子表面提取和显示流体自由表面的方法,建立适合于绘制的流体表面描述,可以用于实时的电脑游戏和虚拟环境。

## 5.3 细节表现

文献[20]研究了粒子和网格结合的方法增强湍流效果。文献[21]利用压强和速度的不连续性对流体表面建模,真实地描述不可压缩黏性流体的小尺度细节表现。使用压力场的阶跃跳变条件实现自由表面和泡沫的表面张力建模。文献[22]提出一种统一的方法描述固体和流体的相变动画,利用基于粒子的拉格朗日方法统一固体变形方程和 Navier-Stokes 方程。该方法的核心是一种混合式 implicit-explicit 表面生成方法,可以很好地描述表面细节,交互式处理适度复杂物体的拓扑变化。文献[23]提出一种虚拟表面方法,通过分析接触角解析小尺度下的表面张力,模拟小尺度流体现象,如:水滴到固体表面。文献[24]利用 octree 数据结构仿真水和烟,使用网格细分技术捕捉小尺度的可视化细节,并提出一种新技术,在 octree 网格上离散 Poisson 方程,产生的线性系统是对称正定的。文献[25]仿真了具有复杂表面(泡沫、表面张力)的自然流体运动。使用3阶隐含表面建模流体形状,没有使用粒子,但实现了与 particle level set 方法一样的流体体积守恒。

文献[26]采用弹簧质量系统表示物体表面,物体内部采用 Navier-Stokes 方程求解变形,模拟柔性物体运动变形情况。文献[15]提出物体和流体边界条件,改进流体和沉浸的刚体之间的相互作用。并结合基本的流体仿真算法,支持平滑融合滴入的流体,正确处理被流体环绕的独立、自由流体团。文献[27]仿真了具有不同黏性、密度的流体之间的相互作用,包括简单表面张力和更复杂的材质作用,如:一种材质转化为另一种,或两种材质混合为第三种。对每种流体单独使用 particle level set 方法。在流体的区域边界,流体参数出现阶跃变化,使用 ghost values 描述。文献[28]提出一种基于粒子的流体碰撞模型,用于不混合流体动画。模型包括:碰撞检测和碰撞响应。该方法允许一种流体贯穿或环绕另一种流体。文献[29]提出刚性流体方法,用于刚体和不可压缩流体之间相互作用的动画显示。使用分布式拉格朗日乘法器计算固体和流体作用的真实运动。文献[30]改进了 Stam 提出的“稳定流体”方法,用于建模多相流体和抑制耗散。利用 Navier-Stokes 方程和 level set 方法,构造了一个多相流体的公式表达,仿真了水和空气的交互。

## 6 结束语

本文介绍了二维、三维流体的建模和绘制方法。二维流体

主要采用傅立叶变换方法进行表面建模,海浪频谱的获得有两种方法:海面浮子记录海面的波动位移,经过傅立叶变换生成海浪频谱,或根据海面图像,经过傅立叶变换生成海浪频谱,三维流体的表面建模主要根据 Navier-Stokes 流体动力学方程描述流体内部速度和压力的变化,利用有限差分方法解 Navier-Stokes 偏微分方程组,计算流体内部各点速度,再通过 Level Set 等方法,利用流体内部的速度建立三维流体表面的方程。流体绘制目前主要采用采用光线跟踪方法,光线跟踪方法可较好地模拟光源照射流体的反射和折射效果。目前,流体动画研究方向在于动画控制、实时绘制和细节表现等方面。

(收稿日期:2007年9月)

## 参考文献:

- [1] Tessendorf J. Simulating ocean water[C]//Simulating Nature: Realistic and Interactive Techniques, SIGGRAPH 2001 Course Notes 47. Los Angeles: ACM Press, 2001.
- [2] Thon S, Ghazanfarpour D. Ocean waves synthesis and animation using real world information[J]. Computers & Graphics, 2002, 26(1): 99-108.
- [3] Stam J. Stable fluids[C]//Proceedings, Annual Conference Series on Computer Graphics, ACM SIGGRAPH 1999. Los Angeles: ACM Press, 1999: 121-128.
- [4] Foster N, Metaxas D. Realistic animation of liquids[J]. Graphical Models and Image Processing, 1996, 58(5): 471-483.
- [5] Foster N, Fedkiw R. Practical animation of liquids[C]//Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2001: 23-30.
- [6] Pozrikidis C. Fluid dynamics: theory, computation, and numerical simulation[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [7] Enright D, Fedkiw R. Robust treatment of interfaces for fluid flows and computer graphics[M]//Hyperbolic Problems: Theory, Numerics, Applications. New York: Springer-Verlag, 2003: 153-164.
- [8] Enright D, Marschner S, Fedkiw R. Animation and rendering of complex water surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 736-744.
- [9] 彭群生, 鲍虎军, 金小刚. 计算机真实感图形的算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] Foster N, Metaxas D. Controlling fluid animation[C]//Proceedings of Computer Graphics International. New York: Addison-Wesley Publishing Co., 1997: 178-188.
- [11] Mihalef V, Metaxas D, Sussman M. Animation and control of breaking waves[C]//Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Grenoble: ACM Press, 2004: 315-324.
- [12] Hong J M, Kim C H. Controlling fluid animation with geometric potential[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2004, 15: 147-157.
- [13] Shin S H, Lee J, Kim S J, et al. Controlling liquids using pressure jump[C]//ACM SIGGRAPH 2006 International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Boston: ACM Press, 2006: 63.
- [14] McNamara A, Treuille A, Popovic Z, et al. Fluid control using the adjoint method[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 449-456.