

# 流体动画生成方法研究综述

张 娟 王昱哲 商 柳 朱登明

(中国科学院计算技术研究所 虚拟现实实验室 北京 100190)

**摘 要** 计算机图形学下的真实感流体动画生成技术, 在影视特效和广告、三维游戏开发、虚拟现实等领域有着重要的应用价值。文章回顾了近些年来流体动画的发展趋势, 将其研究成果归纳为三类: 经验方法、物理方法和数据驱动方法, 并总结这些方法的优缺点。其中重点介绍了主流的物理方法和最新发展的数据驱动方法。

**关键词** 流体动画; 物理方法; 数据驱动

**中图分类号** TP 391 **文献标志码** A

## Review on Fluid Animation Generation

ZHANG Juan WANG Yuzhe SHANG Liu ZHU Dengming

(Virtual Reality Laboratory, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Realistic fluid animation with computer graphics technology has great practical importance in various fields such as film and television special effects and advertising, 3D game development, and virtual reality. This paper reviews the techniques and trend of fluid animation in recent years, summarizing the research results into three categories: experience-based method, physical method and data-driven method, with a comprehensive comparison of their pros and cons. In particular, this paper documents the mainstream physical methods and the latest data-driven methods.

**Keywords** fluid simulation; physical modeling; data-driven

## 1 引 言

计算机中自然场景的真实感模拟有着重要的应用价值, 尤其是流体场景的模拟, 无论是在传统的影视特效、广告、三维游戏开发等领域, 还是在最近兴起的虚拟现实领域, 都有着越来越广泛的应用。流体模拟一直是图形学研究中的热

点, 如何能够真实地描述自然界中流体的运动状态, 使再现的流体动画给人真实的感觉, 是研究者不断追求的目标。

传统的流体动画效果由美术工作者逐帧绘制, 不仅费时费力, 同时也无法模拟复杂的流体运动。随着计算技术的快速发展, 人们开始研究计算机中的流体动画生成算法。从最早的基于经验的波面造型方法, 到现在逐渐成熟的基于物理

收稿日期: 2016-10-27 修回日期: 2016-12-13

作者简介: 张娟, 硕士, 研究方向为虚拟现实和流体重建; 王昱哲, 硕士, 研究方向为流体重建; 商柳, 硕士, 研究方向为流体动画; 朱登明(通讯作者), 副研究员, 研究方向为虚拟现实、计算机图形学, E-mail: mdzhu@ict.ac.cn。

的模拟方法,各种方法在不同时期都扮演着重要的角色,同时也具有各自的优缺点和一定的适用范围。另外,部分研究者为了突破传统的经验方法和物理方法的局限性,开始研究基于数据驱动的流体模拟方法,为流体动画的生成提供了新的解决思路。

本文回顾了近些年来流体动画的发展历史,从最开始的基于经验的波面造型方法到新兴的基于数据驱动的流体模拟方法来介绍流体动画的相关算法研究。

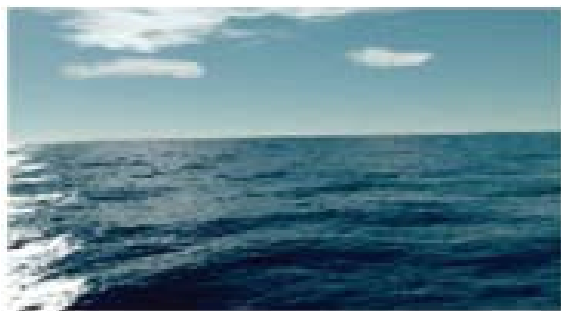
## 2 基于经验的波面造型方法

早期对于波浪模拟的相关工作,大多是将水面简化成高度场,根据长期观测得到的经验模型,直接构造水表面的形态。这种基于经验的波面造型方法大多归类于三种:周期函数方法、噪声方法和傅里叶频谱方法。

周期函数方法是在高度场上叠加近似波浪特征的周期函数。**Schachter**<sup>[1]</sup>使用窄带噪声波形,最早对水面进行数学建模。**Max**<sup>[2]</sup>叠加不同振幅和波长的正弦波或余弦波,形成水面高度场。**Hinsinger** 等<sup>[3]</sup>则通过周期函数来计算各点的高度和位置,模拟无边界的水面场景。**Fournier** 与 **Reeves**<sup>[4]</sup>基于 **Gerstner** 模型叠加形成海面波浪,并运用拉格朗日粒子再现破碎波浪的泡沫效果。这种 **Gerstner** 波与正弦波相比,在两侧有收紧的趋势,和真实海洋面更加接近。还有一种斜切 **Gerstner** 模型由 **Peachy**<sup>[5]</sup>提出,模拟向倾斜海滩行进的水波。

噪声方法是在高度场上叠加类似水面波纹的噪声。**Johanson** 与 **Lejdfors**<sup>[6]</sup>采用 **Perlin** 与 **Hoffert**<sup>[7]</sup>噪声方法和投影网络来模拟海面波浪,得到真实感较强的微波海面。这种方法模拟出的水面波纹随机性强,但只能模拟微波荡漾的水面,无法模拟浪花翻卷、卷曲的效果。

傅里叶频谱方法从海洋学现有的观测和成果入手,利用海浪频谱和方向谱的相关公式,通过叠加不同频率的水波,从而模拟海面波浪。**Mastin** 等<sup>[8]</sup>从图像处理角度出发,使用风力驱动的经验海谱模型及傅里叶变换对白噪声图像进行滤波与合成,得到带有波浪的海面场景。**Tessendorf**<sup>[9]</sup>采用基于统计的快速傅里叶变换经验模型来生成海面,如图 1(a)所示。此方法能很好地描述波幅较小的大规模海平面,是最受欢迎的海洋模拟方法之一。**Jeschke** 与 **Wojtan**<sup>[10]</sup>结合傅里叶频谱方法和欧拉方法,提出一种高效的波面跟踪算法,如图 1(b)所示,能够模拟出更丰富的海洋表面细节。



(a) Tessendorf<sup>[9]</sup>海洋效果



(b) Jeschke 与 Wojtan<sup>[10]</sup>海洋效果

图 1 傅里叶频谱效果

Fig. 1 Result of Fourier spectrum

总的来说,基于经验的波面造型方法简单直观,计算速度快,但模拟场景单一,仅限于模拟大规模水面较平静或规则水波,而不能模拟翻涌的波浪效果和其他种类的流体场景,同时也无法处理与固体的交互作用,于是很多研究者转向基

于物理的流体模拟方法。

### 3 基于物理的流体模拟方法

为了加强流体真实感和模拟更加复杂的水面效果,除了直接对水面进行波面造型外,现在人们更常用的是基于物理的流体模拟方法,主要根据流体控制方程在计算机中模拟流体的运动。其中涉及到的流体控制方程为著名的不可压缩 Navier-Stokes (N-S) 方程:

$$\nabla \cdot \mu = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = -(\mu \cdot \nabla) \mu + \nu \nabla^2 \mu - \frac{\nabla p}{\rho} + f \quad (2)$$

其中,  $t$  为时间;  $\rho$  为密度;  $p$  为压强;  $f$  为体积力;  $\mu$  为速度;  $\nu$  为运动粘性系数,与动力粘性系数  $\eta$  的关系为  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ 。方程(1)为不可压缩条件,描述了质量守恒的性质。方程(2)为动量方程,描述了作用在流体上的力与加速度之间的关系。基于物理的流体模拟方法可以获得任意初始条件和边界条件下的流体速度场,能够有效模拟各种不同形态的流体运动,如水面波浪、水花泡沫、液固耦合等。从追踪流体运动的不同角度出发,基于物理的流体模拟方法主要分为两类:基于网格的欧拉方法和基于粒子的拉格朗日方法。

#### 3.1 基于网格的欧拉方法

基于网格的欧拉方法将流体存在的空间划分成均匀的网格,将 N-S 方程离散到网格上并研究每个固定网格单元上流体物理状态(速度、压强、密度等参数)随时间的变化过程。N-S 方程的求解较为复杂,早期阶段,研究者为了简化问题,采用简化的二维浅水方程<sup>[11]</sup>求得高度场,从而近似模拟水面效果,但无法处理较复杂的流体现象,如水花飞溅和波浪翻涌等。真正意义上首次对三维 N-S 方程求解的是 Foster 与 Metaxas<sup>[12]</sup>,他们使用有限差分方法,在固定网

格上模拟出水中礁石等流体现象。Stam<sup>[13]</sup>提出一种针对不可压缩流体的无条件稳定的隐式求解器,采用半拉格朗日方法求解对流项,这种半拉格朗日对流方法后来被作为大部分欧拉方法的理论基础。

欧拉方法的优点之一在于能够重构出光滑的流体表面,其核心问题之一在于不同介质的界面跟踪。起初,研究者使用隐式表面方法来追踪界面,典型的方法如水平集(Level Set)和粒子水平集(Particle Level Set)。Foster<sup>[14]</sup>使用的 Level Set 方法通过距离函数隐含地表达动态流体界面,很大程度上简化了计算过程。然而,由于其使用有限差分方法求解时会产生数值耗散问题,使界面尖角处被严重抹平,从而导致流体细节缺失。为了缓解这一问题,Enright 等<sup>[15]</sup>提出 Particle Level Set 方法,在流体界面附近的两侧引入有标记的无质量粒子,使用这些粒子来预测界面的不准确度并修正尖锐区域所丢失的流体细节,效果如图 2 所示。Particle Level Set 方法结合了网格方法和粒子方法的优点,实现简单且能获得近乎真实的效果,成为后期流体模拟的核心算法之一。另外,为了解决隐式表面方法精度不高的问题,研究者还提出显示表面方法<sup>[16-18]</sup>,其基本原理是

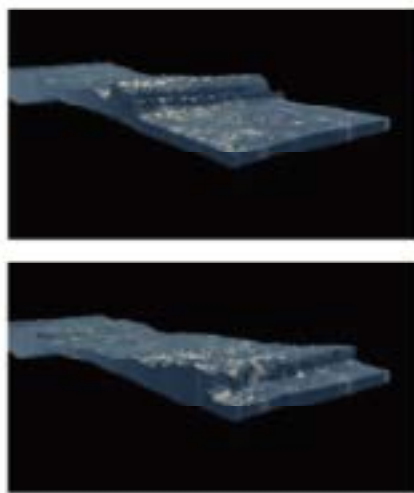


图 2 Enright 等<sup>[15]</sup>方法重建效果

Fig. 2 Reconstructon result from Enright et al<sup>[15]</sup>

在低精度的计算网格中嵌入高精度的表面跟踪方法,使用显式多边形网格表达流体表面,使其不再依赖底层的计算网格。

流体细节的实现需要更精细的网格,而网格的数量决定了计算复杂度。自适应网格是欧拉方法中提高计算效率的一种重要方法。Losasso 等<sup>[19]</sup>使用八叉树结构实现多分辨率网格。除了在物体表面和液体表面附近区域使用正常网格单元外, Irving<sup>[20]</sup>使用高网格单元粗化网格,从而减少计算网格数目。Chentanez 与 Ller<sup>[21]</sup>在这基础之上,保证每一纵列只有一个高网格单元,减少计算复杂度且有利于在 GPU 框架上执行。

### 3.2 基于粒子的拉格朗日方法

基于粒子的拉格朗日方法将流体离散成一系列具有速度、密度等物理属性的粒子,研究单个粒子的物理属性随时间的变化情况,通过追踪粒子的运动获得整体的流体运动效果。光滑粒子动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)方法是拉格朗日方法中的代表性方法,它最初由 Monaghan 与 Monaghan<sup>[22]</sup>提出,用于模拟天体物理领域中的大尺度复杂问题。从数学上来说,SPH 方法是一种积分插值方法,它通过附近一系列离散点处相应的物理量插值计算得到位置  $r$  处的物理量值  $A_s$ , 计算公式为:

$$A_s(r) = \sum_j A_j \frac{m_j}{\rho_j} w(r-r_j, h) \quad (3)$$

其中,  $A_j$  为粒子  $j$  相应的物理量值;  $m_j$ 、 $\rho_j$ 、 $r_j$  分别代表粒子  $j$  的质量、密度和位置;  $w(r-r_j, h)$  为径向对称的核函数;  $h$  为核半径。在实际运用中,选取适当的核函数至关重要。

Ller 等<sup>[23]</sup>首次使用 SPH 方法模拟流体与物体的交互运动,该方法计算要求较低,可达到交互式的帧频率,但由于无法保证流体不可压缩的性质,模拟的流体场景在一定程度上出现视觉失真。SPH 方法需要解决流体的不可压缩性,但不可压缩性质的约束会引入一定的计算量。为了

尽可能减少计算开销,解决流体不可压缩的算法不仅要足够简便,也要在较大时间步长内能够稳定地模拟流体运动。Premzoe 等<sup>[24]</sup>引入基于压强投影的不可压缩 SPH(Incompressible SPH, ISPH)方法约束流体不可压缩性。ISPH 方法能允许较大的时间步长,但在严格保证不可压缩条件时需要消耗大量的计算。为降低计算开销,Becker 与 Teschner<sup>[25]</sup>提出微可压缩 SPH(Weakly Compressible SPH, WCSPH)方法,该方法基于 Trait 方程由密度计算压强,简化了压强的计算量,而为了保证模拟的稳定性,只能允许较小时间步长,这严重降低了整体模拟效率。针对这些问题, Solenthaler 与 Pajarola<sup>[26]</sup>提出预测-校正不可压缩 SPH(Predictive-Corrective Incompressible SPH, PCISPH)方法,在预测-迭代步骤中计算流体压强。这种方法综合了 ISPH 和 WCSPH 的优点,不仅单个时间内的计算开销较低,而且能实现大时间步长下不可压缩流体的快速模拟。Ihmsen 等<sup>[27]</sup>也提出隐式不可压缩 SPH(Implicit Incompressible SPH, IISPH)方法,通过速度迭代更新流体密度信息,可以模拟更低压缩率的不可压缩流体,允许较大的时间步长且伸缩性高。

与欧拉方法中的自适应网格类似,研究者在 SPH 方法基础之上,提出自适应方法<sup>[28]</sup>和双尺度方法<sup>[29]</sup>等,通过对细节丰富或视角关注的局部区域使用更小的粒子,而对非重点区域使用更粗糙的粒子模拟来减少计算量,但同时引入了细节和粗糙区域的划分和合并操作,减少了一些计算性能。

上述这些算法仍然无法满足游戏等实时应用领域的需求,为解决这个问题, Macklin 与 Muller<sup>[30]</sup>提出一种基于位置的流体模拟(Position Based Fluids, PBF)方法。PBF 方法通过对流体粒子的位置建立约束方程以施加不可压缩性,在每次迭代中累计位置变化,允许更大时间步长,使其应用于视频游戏中实时模拟真实感流

体, 如图 3 所示。



图 3 基于位置的流体模拟方法模拟效果<sup>[30]</sup>

Fig. 3 Result of position based fluids method<sup>[30]</sup>

### 3.3 混合方法

欧拉方法能够重构出光滑的流体表面, 然而由于网格细分等操作的问题, 欧拉方法对卷浪、水花等现象的模拟比较困难, 而且对流固耦合或多相流模拟难度也较大。而拉格朗日方法由于粒子间相对独立, 对于非规则物体具有灵活的表现能力, 正好适用于复杂的固体交互和水花飞溅等场景模拟, 但在流体表面跟踪和重构方面较为复杂, 其模拟的真实度较欧拉方法稍为逊色。为了充分利用每种方法的优点, 基于这些方法的混合方法也逐渐兴起,

混合方法的一种思想是用欧拉方法来表示较光滑的水体主体部分, 然后用拉格朗日方法进行小尺度的泡沫和浪花等细节模拟。Takahashi 等<sup>[31]</sup>在欧拉法中混合粒子系统来产生泡沫和水花。Losasso 等<sup>[32]</sup>基于 Level Set 方法模拟大场景, 使用 SPH 方法模拟浪花等细节。Pfaff 等<sup>[33]</sup>使用多分辨率欧拉网格来模拟水体的运动, 先在低分辨率上得到水体的基本运动, 再采样出一定数量粒子进行湍流计算, 叠加出局部细节。Chentanez 与 Ller<sup>[34]</sup>使用包括高度场模型和粒子模型在内的两个物理模型, 同时通过处理复杂的边界条件模拟河流表面及水花。Kim 等<sup>[35]</sup>使用最

近点方法在三维流体表面上计算二维波动方程以增加流体表面的细节。此外, 研究者还在流体力学模型及流体表面跟踪模型的基础上, 通过耦合水花模型<sup>[36]</sup>、气泡模型<sup>[37]</sup>等, 产生丰富的细节效果。这些方法集中在选择何种物理模型以及如何解决多个物理模型间的耦合问题, 模型计算代价高。

还有一种经典的混合算法是质点网格 (Particle In Cell, PIC) 方法, 尤其是其中的流体隐式粒子 (Fluid Implicit Particle, FLIP) 方法。FLIP 方法由 Zhu 与 Bridson<sup>[38]</sup>引入到计算机图形学的流体模拟中, 使用粒子代表流体主体来计算对流项, 而基于辅助网格解决空间上的约束条件, 如边界情况和不可压缩性质等。基于 FLIP/PIC 的流体动画研究成果在近些年非常多<sup>[39-41]</sup>, 其中 Ando 等<sup>[42]</sup>在 FLIP 基础之上, 对粒子大小进行空间自适应, 在加强流体细节的同时提高了运算速度。

近些年来, 基于物理的流体模拟方法在模拟的复杂度、精细度、完善度上有了很大的提高, 这往往建立在更复杂的模型和更大的计算量上。为了提高计算效率, 研究者们一方面通过简化模型减少计算复杂度, 以达到较快的效果。而另一方面, 随着 GPU 计算性能的提高, 研究者充分利用其并行框架, 在 GPU 上运行基于物理的流体模拟方法<sup>[43-45]</sup>, 起到了很好的加速效果, 进一步减少了时间开销。

## 4 基于数据驱动的流体模拟方法

近些年来, 基于物理的流体模拟方法无论是在视觉效果上, 还是在运算效率上, 都取得了很大的进展。即使这样, 在普通情况下, 模拟复杂的流体运动还是无法实现真正的实时效果。另一方面, 随着各种硬件技术和采集设备的发展, 从自然场景中获取数据的方式逐渐增多, 基于数据



驱动的研究方法也逐渐兴起。

在大数据时代,为了还原真实场景下的流体运动,可以采用基于数据驱动的流体模拟方法。考虑数据的类型,可以将数据驱动方法分为两类:基于实测数据的重建方法和基于模型数据的扩展方法。

#### 4.1 基于实测数据的重建方法

基于实测数据的流体重建方法是使用摄像机、深度测量仪器等设备采集目标液体的各项数据,获得真实可靠的流体降维信息,从而还原其三维信息。在获得较为逼真结果的同时,可以大大减少计算所需的资源,提高系统整体的效率。这种方法尚处于探索阶段,因而没有固定的数据采集方式,也没有统一的数据处理方法。研究者所做的,是基于自然场景下的流体性质,考虑用何种方式能有效采集所需的数据以及做怎样的后续处理以得到想要的效果。根据对实测数据处理方法的不同,将其归纳为三种:光线折射方法、多目图像方法和单目图像方法。

##### (1) 光线折射方法

基于采集数据的流体重建方法最早开始于光线折射方法。这种方法需要在水面放置特定的图像标志,通过在水面设立摄像机,拍摄不同水面形态下图像标志物的畸变信息,计算得到水面形态。Murase<sup>[46]</sup>通过光流追踪水面动态变化时水下

图案的扭曲,建立图像扭曲和水面梯度的折射关系模型,由折射模型计算得到水面的结构信息和高度场数据。Morris 与 Kutulakos<sup>[47]</sup>提出假设光线只折射一次时,折射率是可有可无的,使用两台相机搭建立体采集环境,用固定的棋盘格图案作为水底标志物,基于立体视觉原理重建水表面形态,方法和设备如图 4 所示。国内研究者陈丛等<sup>[48]</sup>在这种光线折射方法的基础之上,针对视频数据噪声及计算误差造成重建流体高度场时域跳变的问题,用数据驱动方式获取浅水波模拟关键参数的最优值,改进浅水波的计算求解过程,将其作为物理约束修正初始模型,平滑高度场的跳变,使水表面重建结果更加准确和连贯。

光线折射方法充分利用了流体的折射性质,因此适用于透明的水体,但需要专门的装置来获取放置于水下的已知图案的失真,重建出的水面高度场所表现的流体运动效果也较为简单。这种方法不适用于室外大规模水面条件,因为室外条件下水体看起来不透明。

##### (2) 多目图像方法

多目图像方法主要采用双目摄像机或多台摄像机对目标进行拍摄,获取多视角的图像信息。多目视觉方法在三维重建中得到了广泛运用,然而,由于水体的透明特征、流体运动的复杂性、流体表面特征的周期性和重复性,普通的多目视

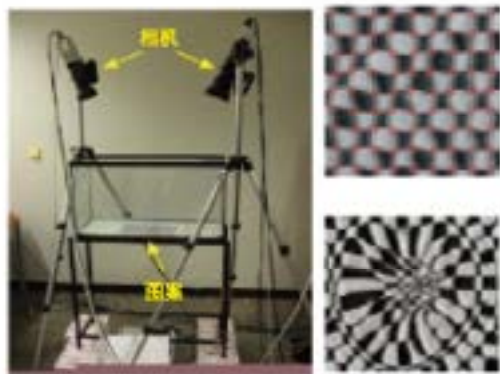
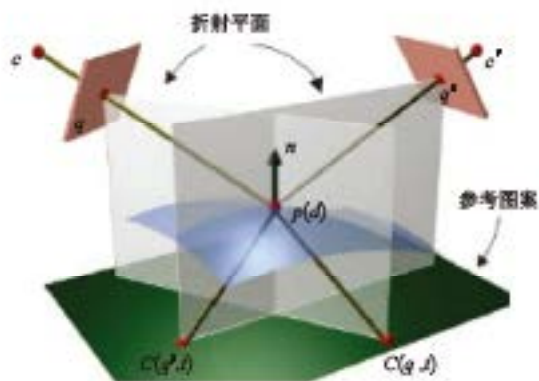


图 4 Morris 与 Kutulakos<sup>[47]</sup>的算法模型和实验装置

Fig. 4 Algorithm model and experimental device from Morris and Kutulakos<sup>[47]</sup>

觉方法很难在流体三维重建中得到应用。因而, 多目图像方法应用到流体重建时, 一般需要对实验的设备和目标进行比较精密的设计, 涉及到目标水体的预处理、摄像机位置标定等方面工作。Ihrke 等<sup>[49]</sup>提出一种基于采集荧光物质亮度的重建方法, 利用荧光物质对水体进行染色, 然后用多台摄像机对目标水体进行拍摄, 利用光线追踪算法, 根据拍摄的水体中荧光物质的亮度重构水体的厚度信息, 在重构水体形态时保证时序上的连续性, 使得模拟的流体动画更加连贯和具有整体性。Jones 等<sup>[50]</sup>设计了一种精细的流体数据采集装置, 利用一块平面旋转镜和一个较大的圆筒镜, 通过连续旋转高速摄像机拍摄牛奶飞溅的高速视频, 这种多视图图像采集方法能够有效地捕获高速变化的水体数据。Wang 等<sup>[51]</sup>提出一种混合多目图像信息和物理约束的动态水体重建算法, 他将水用白色油漆进行染色以消除反射和折射效果, 将光图案投射到水表面, 并基于立体视觉原理, 根据立体相机拍摄到的光图案, 获得水表面的深度信息, 由此重建出水的初始表面; 然后再用一系列物理约束对初始表面进行优化, 实现自动填充空洞区域、删除错误点、优化几何形状等功能, 重建出来的三维动画真实感强且重建效率也很高, 试验装置和重建结果如图 5 所示。Gregson 等<sup>[52]</sup>提出了一种基于多摄像机的随机层析重建算法, 采用一种改进的随机漫步方法, 在不构建体素网格的情况下完成两种液体混合现象

的重建。在拍摄设备方面, 他们使用 5~15 台的 sony 摄像机以半圆的方式摆放拍摄, 在保证拍摄角度多样性的同时也要保证不会拍到对面摄像机。得到重建的流体混合模型后, Gregson 等<sup>[53]</sup>紧接着提出一种逆向求解流体速度场的方法, 并基于速度场可以得到更高分辨率下的流体效果, 极大丰富流体细节且可以控制流体运动。

多目图像方法往往能实现非常细节化的视觉效果, 而为了采集所需的数据, 需要搭建复杂精细的数据采集环境, 对设备的要求和数量也有较高的要求, 且只适用于室内小规模流体的细节重建, 这很大程度上限制了多目图像方法的发展。

### (3) 单目图像方法

由于多目图像对场景和设备的要求较高, 研究者开始考虑基于常用设备的单目图像方法。单目图像方法使用单台摄像机进行拍摄具有更大的应用范围, 可以不只局限于室内的水体模拟, 因此也被用到对户外水面的重建上。该方法基于阴影恢复形状 (Shape From Shading, SFS) 方法, 如图 6 所示, 假设物体表面为朗伯体, 即物体表面的反射率统一, 通过相应算法恢复目标形状, 使其在一定光照条件下, 通过投影函数得到的图像与原图像相似。由于该问题的描述是一个不定方程, 求解具有不确定性。研究者为此添加了一些假设, 使得能够对问题进行求解, 主要分为最小化方法<sup>[54]</sup>、基于传播的方法<sup>[55]</sup>、局部求解方法<sup>[56]</sup>, 以及 Ping-Sing 与 Shah<sup>[57]</sup>和 Pentland<sup>[58]</sup>利



图 5 Wang 等<sup>[51]</sup>试验装置和重建结果

Fig. 5 Experiment device and reconstruction result from Wang et al<sup>[51]</sup>

用线性函数求解的线性方法。

Pickup 等<sup>[59]</sup>将流体视为高度场，首先基于线性 SFS 方法对户外拍摄的单目水面图像进行重建，然后以质量守恒、光强守恒和光滑性为约束条件构造出能量方程，通过最小化能量方程重建出水面速度场，最后进一步得到优化后的流体高度场。这种方法为户外水面的重建提出了新的思路，它可以通过简单的设备得到较为真实的流体动画效果。在 Pickup 基础之上，Li 等<sup>[60]</sup>对能量方程做了改进，以浅水方程和光滑性为约束条件，引入多层计算框架反复迭代计算出流体速度场，使最后重建的高度场尽可能地符合原图像信

息。重建的流体如图 7 所示，能够很好地表现流体波浪等效果，运动过程在时序上具有更好的连续性，同时也能实现与物体交互的运动效果。

国内也有相应的工作受到 Li 等<sup>[60]</sup>方法的启发。全红艳等<sup>[61]</sup>提出基于物理粒子方法来拟合水面，通过浅水方程构造线性几何表面和非线性几何表面约束来重构水面形态，然后使用基于网格的波兹曼方法来求解得到更加准确的速度场。而王昱哲等<sup>[62]</sup>提出一种基于反射率的多尺度水面重建算法，他首先引入反射率模型还原出更符合水面性质的高度场数据，然后利用局部优化算法使得运动剧烈的高度场在小尺度上拟合得更加准确，

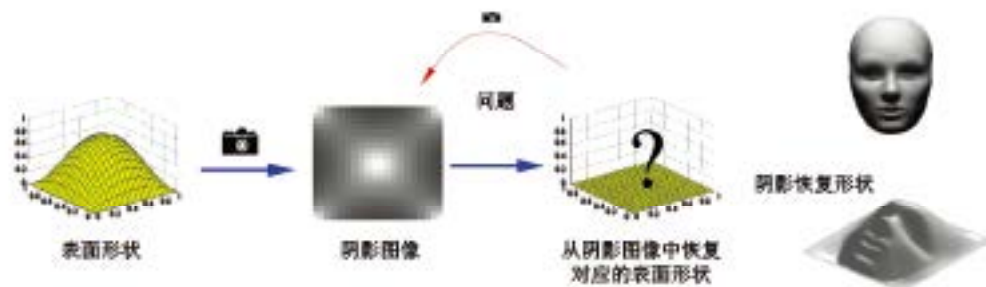


图 6 基于阴影恢复形状示意图

Fig. 6 Diagram of shape from shading

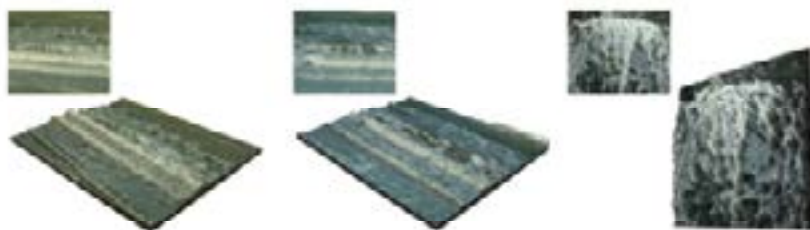


图 7 Li 等<sup>[60]</sup>优化结果

Fig. 7 Optimization result from Li et al<sup>[60]</sup>

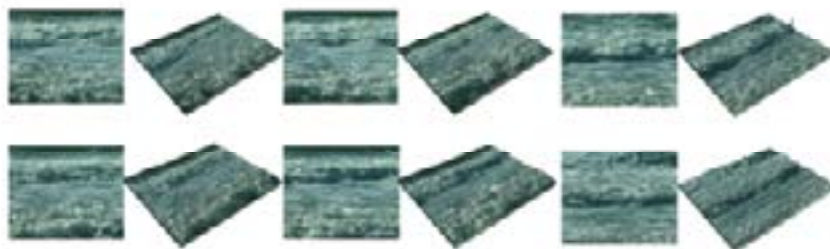


图 8 多尺度算法重建结果<sup>[62]</sup>

Fig. 8 Reconstruction result of multi-scale algorithm<sup>[62]</sup>



从而得到水面初始模型, 再进一步结合流体物理性质, 使得重建效果更加真实生动, 如图 8 所示。

基于实测数据的重建方法研究多种多样, 它利用硬件设备的采集特性, 为重建工作带来真实流体场景的数据, 结合图形图像, 将计算机视觉的理论知识应用于流体的重建工作中, 一方面简化了模拟的计算量, 另一方面也符合流体在真实场景下的运动效果。然而这种思路也存在局限性, 在采集环境的便捷性和重建过程中计算的复杂性上暂时无法达到双赢, 因而还有较长的路要走。

#### 4.2 基于模型数据的扩展方法

除了基于实测数据重建流体外, 研究者还进一步挖掘出数据价值, 根据现有的数据创造出更多的数据。基于模型数据的扩展方法是在现有的大量流体模型的基础之上, 进一步扩展出新的流体运动, 生成更加多样化的流体动画, 这种思想在近些年得到实践。

Raveendran 等<sup>[63]</sup>以类似场景下两帧不同的流体状态作为输入条件, 提出基于空间-时间维度的最近点迭代计算方法, 实现两帧之间相应点的匹配工作, 然后设置不同的参数、差值计算得到不同流体运动状态。王承博与朱登明<sup>[64]</sup>利用简化的 SFS 方法重建出室外水面后, 考虑到水面运动的周期反复性, 提出一种针对三角网格序列的拼

接方法, 将重建的高度场在面积上进行扩展和拼接, 实现大规模水面的流体模拟。而商柳等<sup>[65]</sup>以近岸涌浪为对象, 利用数学形态学算法从水面视频图像中提取出涌浪骨架特征, 如图 9(a) 所示; 然后利用此特征后期编辑和控制涌浪形状与高度, 基于高度场数据生成可控的更加多样的近岸涌浪运动形态, 如图 9(b)、9(c) 所示。

也有部分研究使用机器学习方法来预测流体下一步的运动状态, 从而扩展出流体动画。机器学习的训练步骤需要大量数据集来涵盖可能的流体状态。由于简单的手机游戏只涉及到小部分流体状态, 也只涉及小范围的人体运动情况, Stanton 等<sup>[66]</sup>将研究集中于手机游戏中的流体动画, 首先从一系列数据中学习手机游戏状态下的人体行为, 预测人体下一步动作, 然后匹配对应的流体状态, 从而在手机上快速实现流体动画。Ladicky 等<sup>[67]</sup>将 PCISPH 方法生成的流体模型作为训练样本, 选取能够表现流体大部分运动状态的受力情况作为特征向量, 使用回归森林算法训练样本, 最后在预测阶段, 对于任一帧的流体粒子模型数据, 能直接得到它下一帧的运动状态, 从而扩展生成连续运动的流体动画。由于作为训练样本的流体模型是拉格朗日粒子模型, 因而最后实现的流体效果满足物理特性, 产生的真实

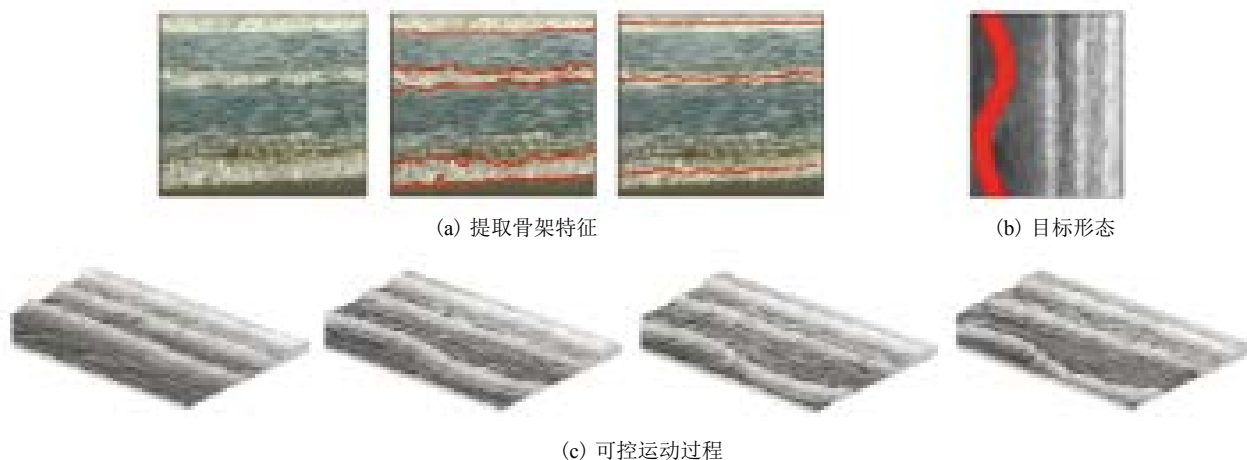


图 9 骨架驱动的近岸涌浪效果<sup>[65]</sup>

Fig. 9 Result of skeleton-driven coastal swell<sup>[65]</sup>

表 1 流体动画生成方法分类

Table 1 Classification of fluid animation generation methods

方法	优势	缺点
基于经验的波面造型方法	计算简单, 速度快	应用范围相对较窄, 真实感有所欠缺
基于物理的流体模拟方法	场景具有多样性, 真实感很强, 能够模拟丰富细节	计算开销大, 很难达到实时效果
基于数据驱动的流体模拟方法	真实感较强, 计算量较小, 动画生成效率高	前期需要准备大量实测数据或模型数据

效果可以与传统的物理方法相媲美, 在计算效率上, 虽然训练阶段花费了大量的时间, 但是在生成流体动画阶段达到了非常好的实时效果。

## 5 结 论

在计算机图形学领域, 流体动画生成方法的研究已有二十余年。现实生活中流体的表现形式多种多样, 流体动画生成方法也层出不穷。本文将这些方法归纳成三类, 它们的优缺点如表 1 所示。

从最近几年在流体模拟领域发表的重要学术论文来看, 其研究成果主要集中于细节增强、算法优化和加速策略等。在细节增强方面, 主要体现在模拟流固耦合<sup>[68]</sup>、多相耦合<sup>[69]</sup>及细长流体<sup>[70]</sup>和泡沫<sup>[71]</sup>等细节现象。在算法优化上, 倾向于提出快速而稳定的算法, 进一步解决不可压缩性、边界处理<sup>[72]</sup>、流体表面张力<sup>[73]</sup>等问题。在加速策略上, 除了使用多尺度方法减少计算量外, 在 GPU 上加速运算过程也成为必要的步骤。

同时, 基于物理的流体模拟方法依然是主流方向, 除了少部分研究成果仅基于网格方法或者粒子方法外, 研究者们更多的是采用基于欧拉/拉格朗日的混合方法, 这充分利用了两种方法各自的优势。另外, 基于数据驱动的流体模拟方法虽然不是很多, 但随着硬件设备的发展, 基于采集数据的三维重建方法已广泛运用到其他领域, 我们也可以借鉴性地将其运用于流体模拟中, 这仍是一个具有挑战性的课题。最近几年, 基于机器学习和深度学习等人工智能方法的研究非常热

门, 而 Ladický 等<sup>[67]</sup>将机器学习与流体动画相结合, 其实现的真实性效果可以与物理方法相媲美, 并达到很好的实时效果, 这为流体模拟提供了一个新的思路, 也具有较大的研究空间。

## 参 考 文 献

- [1] Schachter BJ. Long crested wave models [J]. Graphical Models & Image Processing, 1980, 12(2): 187-201.
- [2] Max NL. Vectorized procedural models for natural terrain: waves and islands in the sunset [J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1981, 15(3): 317-324.
- [3] Hinsinger D, Neyret F, Cani M. Interactive animation of ocean waves [J]. Symposium on Animation, 2002: 161-166.
- [4] Fournier A, Reeves WT. A simple model of ocean waves [J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1986, 20(4): 75-84.
- [5] Peachey DR. Modeling waves and surf [C] // Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques, 1986: 65-74.
- [6] Johanson C, Lejdfors C. Real-time water rendering [D]. Lund University, 2004.
- [7] Perlin K, Hoffert EM. Hypertexture [J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1989, 23(3): 253-262.
- [8] Mastin GA, Watterberg PA, Mareda JF. Fourier synthesis of ocean scenes [J]. Computer Graphics & Applications, 1987, 7(3): 16-23.
- [9] Tessendorf J. Simulating ocean water [C] // Simulating Nature: Realistic & Interactive Techniques, 2001.
- [10] Jeschke S, Wojtan C. Water wave animation via

- wavefront parameter interpolation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(3): 1-14.
- [11] Kass M. Rapid, stable fluid dynamics for computer graphics [J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1990, 24(4): 49-57.
- [12] Foster N, Metaxas D. Realistic animation of liquids [C] // Conference on Graphics Interface, 1996, 58(5): 204-212.
- [13] Stam J. Stable fluids [J]. ACM Transactions on Graphics, 2001, 1999: 121-128.
- [14] Foster N. Practical animation of liquids [J]. Graphical Models & Image Processing, 2001, 58(5): 23-30.
- [15] Enright D, Marschner S, Fedkiw R. Animation and rendering of complex water surfaces [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2002, 21(3): 736-744.
- [16] Wojtan C, Thürey N, Gross M, et al. Physics-inspired topology changes for thin fluid features [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4): 157-166.
- [17] Wojtan C, Turk G. Fast viscoelastic behavior with thin features [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 47.
- [18] Nielsen MB, Bridson R. Guide shapes for high resolution naturalistic liquid simulation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 76-79.
- [19] Losasso F, Gibou F, Fedkiw R. Simulating water and smoke with an octree data structure [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 23(3): 457-462.
- [20] Irving G. Efficient simulation of large bodies of water by coupling two and three dimensional techniques [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 805-811.
- [21] Chentanez N, Ller M. Real-time Eulerian water simulation using a restricted tall cell grid [J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 82.
- [22] Gingold RA, Monaghan JJ. Smooth particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 181(3): 375-389.
- [23] Ller 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.
- [24] Premzoe S, Tasdizen T, Bigler J, et al. Particle-based simulation of fluids [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 401-410.
- [25] Becker M, Teschner M. Weakly compressible SPH for free surface flows [C] // Proceedings of ACM Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2007: 209-217.
- [26] Solenthaler B, Pajarola R. Predictive-corrective incompressible SPH [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): 341-352.
- [27] Ihmsen M, Cornelis J, Solenthaler B, et al. Implicit incompressible SPH [J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2014, 20(3): 426-435.
- [28] Adams B, Pauly M, Keiser R, et al. Adaptively sampled particle fluids [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 48.
- [29] Solenthaler B, Gross M. Two-scale particle simulation [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2011, 30(4): 76-79.
- [30] Macklin M, Muller M. Position based fluids [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013, 32(4): 104.
- [31] Takahashi T, Fujii H, Kunimatsu A, et al. Realistic animation of fluid with splash and foam [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 391-400.
- [32] Losasso F, Talton J, Kwatra N, et al. Two-way coupled SPH and particle level set fluid simulation [J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2008, 14(4): 797-804.
- [33] Pfaff T, Thürey N, Cohen J, et al. Scalable fluid simulation using anisotropic turbulence particles [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6): 81-95.
- [34] Chentanez N, Ller M. Real-time simulation of large bodies of water with small scale details [C] // Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2010: 197-206.
- [35] Kim T, Tessendorf J, Thürey N. Closest point turbulence for liquid surfaces [J]. ACM

- Transactions on Graphics, 2013, 32(2): 539-555.
- [36] Dan G, Bargteil AW. Physics-based animation of large-scale splashing liquids [J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(6): 2504-2507.
- [37] Patkar S, Aanjaneya M, Karpman D, et al. A hybrid Lagrangian-Eulerian formulation for bubble generation and dynamics [C] // ACM Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2013: 105-114.
- [38] Zhu Y, Bridson R. Animating sand as a fluid [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 965-972.
- [39] Ando R, Tsuruno R. A particle-based method for preserving fluid sheets [C] // ACM Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2011: 7-16.
- [40] Boyd L, Bridson R. MultiFLIP for energetic two-phase fluid simulation [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2012, 31(2): 16:1-16:12.
- [41] Jiang CF, Schroeder C, Selle A, et al. The affine particle-in-cell method [J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 1-10.
- [42] Ando R, Thurey N, Wojtan C, et al. Highly adaptive liquid simulations on tetrahedral meshes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 96.
- [43] Goswami P, Schlegel P, Solenthaler B, et al. Interactive SPH simulation and rendering on the GPU [C] // Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2010: 55-64.
- [44] Yang L, Li S, Hao A, et al. Realtime two-way coupling of meshless fluids and nonlinear FEM [J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(7): 2037-2046.
- [45] Shao X, Zhou Z, Magnenat-Thalmann N, et al. Stable and fast fluid-solid coupling for incompressible SPH [J]. Computer Graphics Forum, 2015, 34(1): 191-204.
- [46] Murase H. Surface shape reconstruction of a nonrigid transport object using refraction and motion [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(10): 1045-1052.
- [47] Morris NJW, Kutulakos KN. Dynamic refraction stereo [C] // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision, 2005, 2: 1573-1580.
- [48] 陈丛, 王庆, 肖照林. 一种视频数据驱动的水体表面模型生成方法 [J]. 计算机应用研究, 2014, 31(3): 942-945.
- [49] Ihrke I, Goidluecke B, Magnor M. Reconstructing the geometry of flowing water [C] // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision, 2005: 1055-1060.
- [50] Jones A, Bolas M, McDowall I, et al. Concave surround optics for rapid multiview imaging [C] // ACM Siggraph 2006 Research Poster, 2006.
- [51] Wang H, Liao M, Zhang Q, et al. Physically guided liquid surface modeling from videos [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(3): 341-352.
- [52] Gregson J, Krimmerman M, Hullin MB, et al. Stochastic tomography and its applications in 3D imaging of mixing fluids [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 1-10.
- [53] Gregson J, Ihrke I, Thuerey N, et al. From capture to simulation: connecting forward and inverse problems in fluids [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 70-79.
- [54] Lee KM, Kuo CCJ. Shape from shading with a linear triangular element surface model [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1993, 15(8): 815-822.
- [55] Bichsel M, Pentland AP. A simple algorithm for shape from shading [C] // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1992.
- [56] Lee CH, Rosenfeld A. Improved methods of estimating shape from shading using the light source coordinate system [J]. Artificial Intelligence, 1985, 26(2): 125-143.
- [57] Ping-Sing T, Shah M. Shape from shading using linear approximation [J]. Image & Vision Computing, 1999, 12(8): 487-498.
- [58] Pentland A. Shape information from shading: a theory about human perception [J]. Spatial Vision, 1989, 4(2): 165-182.
- [59] Pickup D, Li C, Cosker D, et al. Reconstructing



- mass-conserved water surfaces using shape from shading and optical flow [M] // Lecture Notes in Computer Science, 2011, 6495: 189-201.
- [60] Li C, Pickup D, Saunders T, et al. Water surface modeling from a single viewpoint video [J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2013, 19(7): 1242-1251.
- [61] Quan HY, Wang CB, Song YH. Fluid re-simulation based on physically driven model from video [J]. Visual Computer, 2015: 1-14.
- [62] 王昱哲, 张娟, 朱登明, 等. 基于反射率的多尺度水面重建方法 [J]. China Virtual Reality, 2016.
- [63] Raveendran K, Wojtan C, Thuerey N, et al. Blending liquids [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 1-10.
- [64] 王承博, 朱登明. 数据驱动的大规模水面动画合成方法 [J]. 图学学报, 2014, 35(4): 491-497.
- [65] 商柳, 冯笑冰, 朱登明, 等. 一种骨架驱动的近岸涌浪动画合成方法 [J]. 软件学报, 2016, 27(10): 2600-2611.
- [66] Stanton M, Humberston B, Kase B, et al. Self-refining games using player analytics [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 1-9.
- [67] Ladický L, Jeong SH, Solenthaler B, et al. Data-driven fluid simulations using regression forests [J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): 1-9.
- [68] Akinci N, Ihmsen M, Akinci G, et al. Versatile rigid-fluid coupling for incompressible SPH [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 62.
- [69] Yan X, Jiang YT, Li CF, et al. Multiphase SPH simulation for interactive fluids and solids [J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4): 1-11.
- [70] He X, Wang H, Zhang F, et al. Robust simulation of sparsely sampled thin features in SPH-based free surface flows [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 34(1): 1-9.
- [71] Busaryev O, Dey TK, Wang H, et al. Animating bubble interactions in a liquid foam [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 13-15.
- [72] Söderström A, Karlsson M, Museth K. A PML based non-reflective boundary for free surface fluid animation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(5): 885-900.
- [73] Schechter H, Bridson R. Ghost SPH for animating water [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 7.