

# 一种视频数据驱动的水体表面模型生成方法<sup>\*</sup>

陈丛, 王庆, 肖照林

(西北工业大学 计算机学院, 西安 710072)

**摘要:** 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, 提出一种视频数据驱动的流体表面模型生成方法。首先, 在折射的流体表面重建算法基础上, 利用水下场景视频数据生成初始流体表面高度场; 其次, 为了提高模型的时间连贯性, 用数据驱动方式获取浅水波模拟关键参数的最优值; 最后改进了浅水波模拟的计算求解过程, 并将其作为物理约束来修正初始模型。基于真实数据的实验结果表明, 该方法能够有效平滑流体模型高度场的跳变, 使水体表面重建结果更加准确和连贯。

**关键词:** 流体表面重建; 高度场跳变; 浅水波方程模拟; 数据驱动

**中图分类号:** TP391.41

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-3695(2014)03-0942-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.03.073

## A video-data-driven method to generate water surface models

CHEN Cong, WANG Qing, XIAO Zhao-lin

(School of Computer Science & Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to relieve the jump effects of the height fields caused by video noises and computing errors, this paper proposed a video-data-driven method to generate models of fluid surfaces. First, it used shape from refraction method to reconstruct the initial water surface, and set the initial height fields with the reconstruction results. Then, in order to improve the time coherence of the reconstruction sequences, it chose the optimized parameter of shallow water simulation with a data-driven solution. After that, it improved the computational process of the shallow water simulation and regarded it as the physical constraint to refine the initial models. It tested the proposed method on the real data sets, and the experimental results show the effectiveness of proposed method. The simulated fluid surfaces in videos sequences appear more accurate in spatial domain and much visually satisfied in temporal domain.

**Key words:** fluid surface reconstruction; jump effects; shallow water simulation; data-driven

## 0 引言

近年来, 动态三维流体表面的建模在计算机视觉与图形学<sup>[1]</sup>、海洋工程<sup>[2]</sup>等研究领域得到了广泛的关注。基于物理的流体表面数值模拟演化方法已经趋于成熟<sup>[3]</sup>, 然而获取现实世界的三维动态流体表面仍然是一个具有相当难度和挑战性的工作。目前, 计算机视觉领域中基于视频的流体表面建模方法大体上可以分为基于表面反射的方法<sup>[1,4]</sup>和基于流体折射的方法<sup>[5-7]</sup>两类。

基于反射的流体表面建模方法主要用于不透明流体的表面建模。Wang 等人<sup>[1]</sup>将水体用白漆染色并在水表面投射纹理, 利用双目相机得到流体表面深度图, 并用物理约束来修正初始模型, 获得了水体细节的高精度重建。该方法不适用于大尺度的场景, 而且需要对流体染色, 改变了其固有的物理属性。Pickup 等人<sup>[4]</sup>利用室外环境中的湖泊、河流等的不透明性质, 首先使用 Shape From Shading 算法获得动态流体表面模型, 然后利用光流法加质量守恒约束求解流体表面速度场, 最后对水表面形状进行优化。其方法局限性在于传统光流法亮度不变假设在流体现象中并不成立<sup>[8]</sup>。

基于折射的流体表面建模方法是由 Murase<sup>[5]</sup>首次提出的。该方法首先通过光流法追踪水底图像的畸变模型, 然后利用折射模型计算流体表面法向, 最后对其进行积分来恢复出水表面的形状。Morris 等人<sup>[6]</sup>通过在水底放置标定板, 然后使用折射不一致对两幅图像中的特征点进行匹配, 较为精确地解决了水表面重建问题。Ding 等人<sup>[7]</sup>采用一个  $3 \times 3$  的相机阵列捕获水底图像, 然后对前后帧图像和不同相机中图像进行特征匹配, 利用时间-空间的匹配图重建出随时间变化的水表面。上述方法实验大多需要设计复杂的实验装置, 并且重建流体表面时采取独立视频帧的重建, 没有把前后帧的时间连贯性以及流体动力学性质作为约束。

另一方面, 基于高度场的流体模拟在计算机图形学领域是一个重要研究方向。Kass 等人<sup>[9]</sup>首先将线性简化求解的浅水波方程模拟引入到计算机图形学, 并进行流体表面的实时计算。Layton 等人<sup>[10]</sup>将半拉格朗日对流项加入浅水波方程模拟进行改进。Chentanez 等人<sup>[11]</sup>提出了一种混合网格法与粒子系统的浅水波方程解法, 对大尺度的水体自然现象进行了逼真的模拟。Nielsen 等人<sup>[12]</sup>提出了一种从初始粗略高度场合成带有高频细节的海洋波面运动模型的方法。该方法无须用户交互且附带物理可信的速度场信息。虽然基于物理的方法能

收稿日期: 2013-05-05; 修回日期: 2013-06-30 基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2012AA011803)

作者简介: 陈丛(1987-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要研究方向为数据驱动的流体模拟(136776427@qq.com); 王庆(1969-), 男, 陕西西安人, 教授, 博导, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉、模式识别; 肖照林(1984-), 男, 上海人, 博士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、光场和计算摄影学。

够产生逼真的视觉效果,但无法与真实世界的流体现象保持物理一致性。

为了解决上述问题,本文在文献[13]所做工作的基础上,提出了一种结合浅水波方程模拟作为物理约束修正初始水面模型的方法,提高了模型的时间连贯性。本文的创新点在于:a)不同于虚拟流体模拟方法,本文将视频重建得到的真实流体表面数据直接应用于计算过程;b)用数据驱动的方法获取重要参数值,并且对浅水波方程的离散计算方法作出了改进。

## 1 系统概述

在水面运动比较缓和且不会出现流体分离(光线在流体表面只发生一次折射)的情况下,为了从水体折射失真的视频中恢复动态流体表面的三维模型,用高度场来表示水面模型是一种很好的选择。由于水面距水底相对较浅,可以认为视频中水体的运动遵循浅水波方程。本文将基于折射的流体表面重建与浅水波方程模拟这两种方法结合起来,整体流程如图1所示。首先将一幅带纹理的图案固定放置在透明水体的平坦底部,通过视频配准和估计失真函数来重建初始水面三维模型,进而利用改进的浅水波模拟对初始模型进行浅水运动阻尼值的估算;随后用浅水波模拟生成的水面替换初始模型中的异常帧,从而得到最终的动态流体三维表面模型。实验结果表明,本文方法能够获得准确的视觉效果,同时具有更高的计算效率。



图1 三维水体表面模型生成的整体框架

## 2 动态三维流体表面重建

本文利用文献[13]介绍的方法来重建动态三维流体表面模型,具体过程如图2所示。

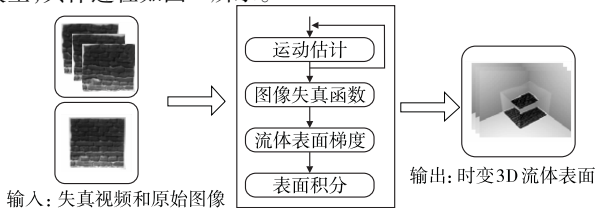


图2 动态流体表面重建

对于水下场景视频序列  $F = \{I_1, I_2, \dots, I_N\}$ , 利用原始静止水面的无失真水下场景图像  $I_{true}$ , 分别对每一帧的失真图像  $I_t$  作运动估计来得到每一帧的图像失真函数  $w_t(X)$ , 其中  $X$  为图像坐标位置, 定义如下:

$$I_{true}(X) = I_t(X + w_t(X)) \quad (1)$$

在运动估计中, 文献[12]使用了 Rueckert 等人<sup>[14]</sup>提出的基于 B 样条的自由变形模型, 其核心思想是通过调整一组控制点来实现图像的几何变形。为使图像失真函数更为准确, 其对运动估计进行多次迭代并更新每一帧的失真函数  $w_t(X)$ 。根据折射关系的推导失真函数  $w_t(X)$  与  $t$  时刻水表面的高度场  $h(X, t)$  之间的关系<sup>[15]</sup>:

$$w_t(X) = \alpha \nabla h(X, t) \quad (2)$$

其中:  $\alpha$  是与静止水面高度  $h_0$  和折射系数  $n$  相关的常量。在运动估计迭代完成得到最终的失真函数  $w_t(X)$  后, 根据式(2)计算出流体表面每一点的梯度  $\nabla h(X, t)$ , 最后通过表面积

分<sup>[16]</sup>得到随时间变化的三维流体表面初始模型。

## 3 改进的浅水波计算

虽然上述基于折射的流体表面重建算法取得了较高的单帧精度, 但由于图像配准误差及视频数据噪声的影响, 重建生成的连续视频帧中存在一些较为明显的水面运动跳变(异常帧), 其量化表示如图3所示。根据经验, 虚线值代表所有帧水面运动幅度均值的2倍, 而高于虚线的点代表异常帧。

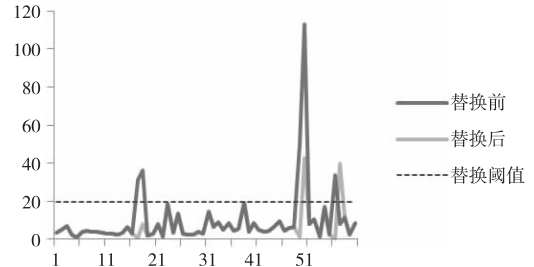


图3 高度场中异常帧替换前后的水面运动幅度

这里定义水面运动幅度  $Amp_n$ , 其表示第  $n$  帧到第  $n+1$  帧水面的运动变化,  $x, z$  为高度场的分辨率,  $h_{i,k}$  为对应位置水面的高度。

$$Amp_n = \frac{\sum_{i=1}^x \sum_{k=1}^z (h_{i,k}^{n+1} - h_{i,k}^n)^2}{x \times z} \quad (3)$$

为提高模型的时间连贯性, 缓解异常帧高度场带来的跳变, 提出一种改进的浅水波计算方法。该方法利用前驱帧作为异常帧的约束, 结合水体遵循浅水波运动方程, 近似推演并替换异常帧, 实现在时间域平滑水体运动的效果。

### 3.1 浅水波方程

浅水波方程(shallow water equations, SWE)是描述流体运动的 Navier-Stokes 方程的简化形式。其具体基于以下两点假设:a)浅水波方程水面只需用二维高度场表示, 然而这会导致诸如破碎波、漩涡等三维流体现象无法用该方法生成;b)浅水波方程水体运动主要由内部速度的水平分量决定, 垂直分量的影响可以忽略不计, 并且同一柱状位置水体速度的水平分量沿高度值的变化近似恒定。如果水表面受扰动产生非常陡峭的波面, 浅水波模型就不再精确。考虑到本文实验中水面运动相对和缓, 无明显的翻滚、飞溅现象, 因此可以视本文计算水体对象遵循浅水波运动规律。假定重力方向与  $y$  轴平行, 二维模拟平面即  $x-z$  平面。在如下公式中,  $d$  表示水的深度,  $b$  表示水底地形的高度,  $h = b + d$  表示水表面高度值,  $v = (u, w)$  表示流体的水平速度,  $g$  表示重力,  $a_{ext}$  表示外界加速度, 则浅水波方程可以写为

$$\frac{Dd}{Dt} = \frac{\partial d}{\partial t} + v \cdot \nabla d = -d \nabla \cdot v \quad (4)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v = -g \nabla h + a_{ext} \quad (5)$$

其中:  $D$  是物质导数算子  $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla$ <sup>[17]</sup>, 算子等式右边第二项为对流项。这两个方程分别描述了质量守恒以及牛顿运动定律  $F = ma$ 。关于 SWE 的细节可以参考文献[18]。由于本实验中水速较小且水体表面深度变化缓慢, 因此可以忽略式(4)和(5)中的对流项。另外水底地形平坦, 可以认为  $b = 0$  (即  $d = h$ )。消除对速度项  $v$  的依赖并整理合并后, 可以得到式(6)。Kass 等人<sup>[9]</sup>提到的这种简化虽然流体力学工程应用

中精度并不高,但足以满足视觉真实感的需求。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = g d \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

### 3.2 离散数值求解

为数值求解式(6),本文采用了 Kass 等人<sup>[9]</sup>的交错网格及离散化方法来描述二维高度场,如图4所示,高度场  $h$  与水平速度  $v=(u, w)$  以半格的宽度相互交错。与非交错形式相比,这种网格划分方法的优点是使得无偏中心差分更加鲁棒<sup>[18]</sup>。通过一阶有限差分近似并在每一时间步的计算中将水深  $d$  看做常数,式(6)可离散表示为

$$\frac{\partial^2 h_{i,k}}{\partial t^2} = -c(d_{i-1,k} + d_{i,k})(h_{i,k} - h_{i-1,k}) + c(d_{i,k} + d_{i+1,k})(h_{i+1,k} - h_{i,k}) - c(d_{i,k-1} + d_{i,k})(h_{i,k} - h_{i,k-1}) + c(d_{i,k} + d_{i,k+1})(h_{i,k+1} - h_{i,k}) \quad (7)$$

其中:  $c = g/(2(\Delta x)^2) = g/(2(\Delta z)^2)$ , 格间距  $\Delta x = \Delta z$ , 具体推导细节可以参考文献[10]。结合高度场  $h$  的一阶精度隐式微分公式:

$$h(t) = 2h(t - \Delta t) - h(t - 2\Delta t) + (\Delta t)^2 \ddot{h}(t) \quad (8)$$

最终得到

$$\begin{aligned} & -m(d_{i,k-1} + d_{i,k})h_{i,k-1}(t) - m(d_{i-1,k} + d_{i,k})h_{i-1,k}(t) + \\ & [1 + m(d_{i,k-1} + d_{i-1,k} + 4d_{i,k} + d_{i+1,k} + d_{i,k+1})]h_{i,k}(t) - \\ & m(d_{i,k} + d_{i+1,k})h_{i+1,k}(t) - m(d_{i,k} + d_{i,k+1})h_{i,k+1}(t) = \\ & 2h_{i,k}(t - \Delta t) - h_{i,k}(t - 2\Delta t) \end{aligned} \quad (9)$$

其中:  $g(\Delta t)^2/(2(\Delta x)^2)$  简记为  $m$ ,  $h_{i,k}(t)$  表示  $t$  时刻在位置  $(i, k)$  处的高度值。根据式(9)可知,  $t$  时刻任意位置的高度场  $h$  值可用其上两个时间步的结果推演得到。注意到式(9)只是描述位置  $(i, k)$  为中心的  $h_{i,k}(t)$  与同时刻邻近高度值的关系(图4),而二维高度场的每一个位置都存在类似的等式,将所有位置的等式依照各未知量  $h_{i,k}(t)$  由左至右、由上至下的顺序重新排列(不相邻的位置系数为0)并全部联立,则得到以各个位置  $h_{i,k}(t)$  为变量的稀疏对称正定线性方程组。

Kass 等人<sup>[9]</sup>用交替方向隐式法(alternating direction implicit, ADI)来求解式(9),将计算过程分为  $x, z$  方向两个子步骤,其中每个子步骤得到的三对角矩阵线性方程组可用 Thomas 算法<sup>[17]</sup>求解且每个子步骤均为半个时间步长,但其具体的迭代格式缺乏  $x$  与  $z$  方向的耦合。Layton 等人<sup>[10]</sup>为加强耦合,对 ADI 迭代过程进行了改进(文献[10]中的式(40)及(41)),虽然替换异常帧时,经一次计算的生成高度场  $h$  的误差在效果上并不明显,但如果仅给定前两帧高度场,并将生成的高度场  $h$  作下一次的输入而反复计算后续帧,可以看到线条效应逐步放大,如图5(a)所示,这是由 ADI 算法分方向进行的特点所决定的。为了从根本上消除线条效应,使两个方向的计算完全耦合,本文对数值求解方法作出改进,采用了文献[18]中的修改版不完全 Cholesky(0 层)共轭梯度法(modified incomplete Cholesky conjugate gradient level zero, MICCG(0))求解式(9)中的五点稀疏对称正定矩阵。

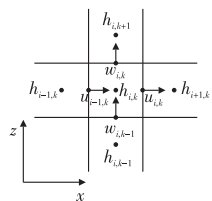


图4 二维高度场的离散表示

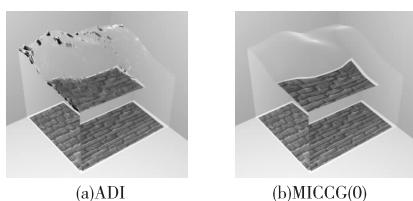


图5 利用 ADI 与 MICCG(0) 后续生成高度场误差效果比较

通过将式(9)等式右边作如下轻微改变,可以模拟水的阻尼效果(粘性):

$$\begin{aligned} & -m(d_{i,k-1} + d_{i,k})h_{i,k-1}(t) - m(d_{i-1,k} + d_{i,k})h_{i-1,k}(t) + \\ & [1 + m(d_{i,k-1} + d_{i-1,k} + 4d_{i,k} + d_{i+1,k} + d_{i,k+1})]h_{i,k}(t) - \\ & m(d_{i,k} + d_{i+1,k})h_{i+1,k}(t) - m(d_{i,k} + d_{i,k+1})h_{i,k+1}(t) = \\ & (2 - \tau)h_{i,k}(t - \Delta t) - (1 - \tau)h_{i,k}(t - 2\Delta t) \end{aligned} \quad (10)$$

其中:阻尼系数  $\tau$  满足  $0 < \tau < 1$ , 值越大则水的粘性越大。

基于物理的流体模拟一般首先虚拟出水体在场景里的初始位置及速度,然后利用流体求解器模拟水在后续时间步的运动变化,其实验结果往往过于理想化。本文的浅水波模拟则替代了虚拟模型,把来源于视频数据的真实高度场表面直接加入式(9)的计算过程,使得计算结果更接近真实情况。另外,本文方法将原始异常高度场替换为采用数据驱动方式得到的新高度场,从而缓解了异常帧带来的视频跳变问题。

### 3.3 浅水运动阻尼值的选取

本文提出一种数据驱动的方法来获得阻尼系数  $\tau$ , 将已替换异常帧后的高度场序列  $\{h_1^n\}$  作进一步处理,存储总数为  $m$  的高度场序列的  $m-1$  个相邻高度差矩阵  $\{d_1^n\}$ , 同时保留  $\{h_1^n\}$  的第0帧及所有奇数帧,相继将从帧号2开始的偶数帧高度场用浅水波模拟算法生成,得到高度场序列  $\{h_2^n\}$  及高度差矩阵  $\{d_2^n\}$ 。本文用高度差矩阵的  $F$ -范数(与式(3)类似)描述水面运动剧烈程度,即  $f = \|d\|_F$ 。由于  $\tau$  值表示水的粘性,需要保证各个前一帧到生成高度场的水面运动剧烈程度与替换前大体一致,定义总运动变化比  $r(\tau)$ :

$$r(\tau) = \sum_{i=0}^{m-1} f_2^{2i+1} / f_1^{2i+1} \quad (11)$$

其中:  $i=0, 1, \dots, \lfloor (m-1)/2 \rfloor$ , 应选取使  $r(\tau)$  最为接近  $\lfloor (m-1)/2 \rfloor$  (图7虚线)的  $\tau$  值作为替换异常帧计算时的最优值。图6、7分别描述了不同  $\tau$  值对高度场  $\{h_2^n\}$  及总运动变化比  $r(\tau)$  的影响,可以发现视觉效果与量化曲线描述一致,  $\tau$  值过小会引起水面剧烈震荡,而过大则会产生严重的粘滞效果。

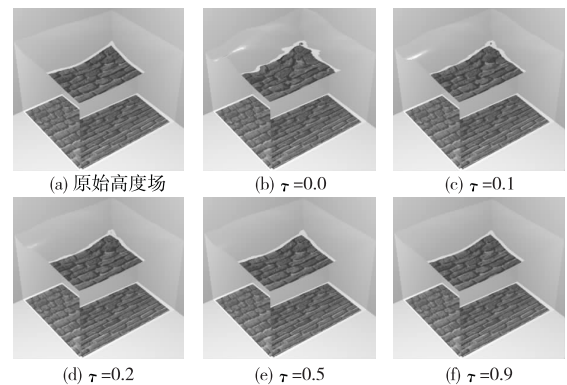


图6 Brick 数据不同  $\tau$  值对生成高度场的影响(同一帧)

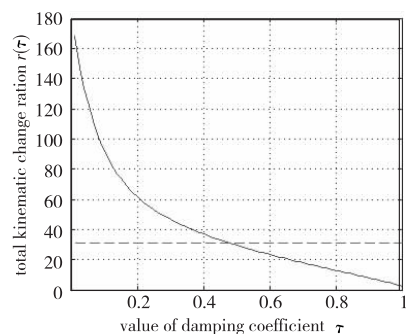


图7 Brick 数据粘性系数  $\tau$  与总运动变化比曲线



## 4 实验结果与分析

本文实验数据来自文献[19]的水下场景视频,视频序列的长度均为61帧,帧率为15 Hz,即 $\Delta t = 1/15$  s。针对水下视频重建得到初始流体表面模型生成以及浅水方程阻尼值选取问题,本文采取数据驱动的策略,首先动态水体高度场初始模型是从真实视频中重建得到,其次阻尼系数 $\tau$ 的选取是依照浅水运动剧烈程度与初始模型最相近的原则。求解浅水波方程时,采用MICCG(0)来代替ADI算法,从根本上消除了线条效应,图5清晰地表示了不同算法的优劣。本文将动态高度场模型结合水下静止图像,用POV-Ray渲染得到了合成的透视图和正视图。透视图主要用于视觉效果展示,而正视图用来与原视频图像作对比。图8给出了Brick数据(最优 $\tau = 0.48$ )中第17、56(分别第一、二行)异常帧的水下视频图像与替换前后正视图的对比,从中间图可以看出重建得到的高度场正视图折射效果与视频数据基本一致,但边缘细节存在较大变形,而右图浅水波模拟生成的高度场与替换前异常帧相比更接近原始视频,这验证了浅水波方程物理约束的有效性。对于文献[19]中的Small数据,图9给出其水下图像及不同 $\tau$ 值(最优 $\tau = 0.35$ )对生成高度场的影响。图10给出其粘性系数 $\tau$ 与总运动变化比曲线,其结果再次表明了视觉效果与量化曲线描述一致。

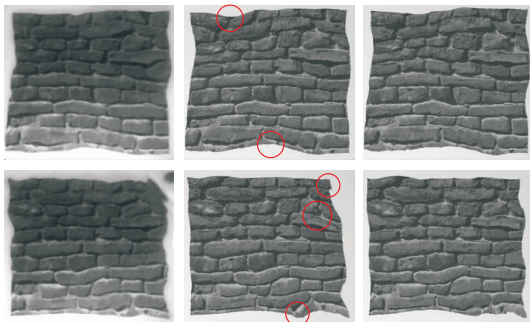


图8 不同异常帧的原始视频(左)、替换前异常帧高度场(中)、替换后高度场(右)

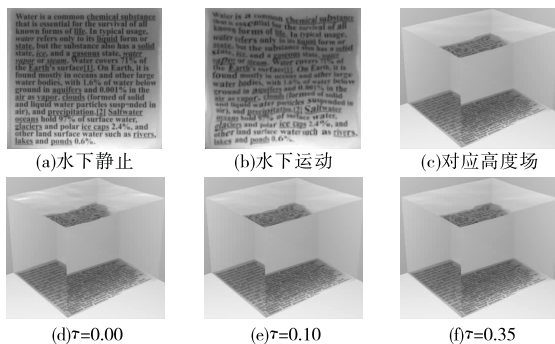


图9 Small数据不同 $\tau$ 值对生成高度场的影响(同一帧)

在算法运行时间方面(Intel® Core™ 2 Duo CPU P8600, 2.40 GHz),ADI算法生成一帧高度场的平均时间为10 ms,而MICCG(0)算法则为102 ms,这是由MICCG(0)算法的迭代过程及计算预条件所决定。考虑计算结果准确性的提升,每帧约0.1 s的时间可以接受。与视频重建初始水面高度场每帧所需20 min相比,利用MICCG(0)选取阻尼系数 $\tau$ 及替换异常帧高度场共需要13 min,且替换后高度场与视频数据基本一致,说明了本文方法的高效性。

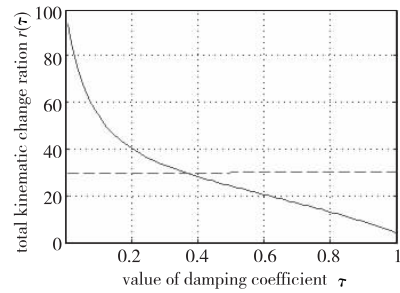


图10 Small数据粘性系数 $\tau$ 与总运动变化比曲线

## 5 结束语

本文针对由水下场景视频重建的初始水面模型,提出了一种利用改进的浅水波方程模拟替换异常帧的修正方法,并用数据驱动的方法获得了最优阻尼系数值。实验结果表明,本文方法能够有效地缓解一般的流体表面重建算法所带来的视频跳变,实现时间域平滑水体运动的效果。本文方法可以仅用高度场数据来推演水面在后续时刻的演化而不需要水体运动的速度信息,但浅水波模拟过程中忽略了对流项,使得模拟精度有一定缺失。本文方法适用于水体运动相对缓慢的场景,但受浅水波模型限制而无法有效地处理水花飞溅翻滚等现象。在后续工作中,笔者将探索一种能从水面高度场模型估计水体内部运动速度的方法,以生成流体与几何物体的交互动画。

### 参考文献:

- [1] WANG Hua-min, LIAO Miao, ZHANG Qing, *et al.* Physically guided liquid surface modeling from videos[C]//Proc of ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2009.
- [2] GALLEG0 G, YEZZI A, FEDELE F, *et al.* A variational wave acquisition stereo system for the 3-D reconstruction of oceanic sea states[C]//Proc of the 30th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2011.
- [3] WOJTAN C, MÜLLER M, BROCHU T. Liquid simulation with mesh-based surface tracking[C]//Proc of ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2011.
- [4] PICKUP D, LI Chuan, COSKER D, *et al.* Reconstructing mass-conserved water surfaces using shape from shading and optical flow[C]//Proc of the 10th Asian Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2011: 189-201.
- [5] MURASE H. Surface shape reconstruction of a nonrigid transport object using refraction and motion[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10): 1045-1052.
- [6] MORRIS N J, KUTULAKOS K N. Dynamic refraction stereo[C]//Proc of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]: IEEE Press, 2005: 1573-1580.
- [7] DING Yuan-yuan, LI Feng, JI Yu, *et al.* Dynamic fluid surface acquisition using a camera array[C]//Proc of IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 2478-2485.
- [8] LI Feng, XU Li-wen, GUYENNE P, *et al.* Recovering fluid-type motions using Navier-Stokes potential flow[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE Press, 2010: 2448-2455.
- [9] KASS M, MILLER G. Rapid, stable fluid dynamics for computer graphics[C]//Proc of ACM SIGGRAPH. 1990.
- [10] LAYTON A T, Van De PANNE M. A numerically efficient and stable algorithm for animating water waves[J]. *The Visual Computer*, 2002, 18(1): 41-53.

(下转第948页)

在实际应用中,算法很难同时满足以上三个指标,需要用户在使用时综合考虑。根据应用目的的不同选取合适的算法是必需的。采样终结的判据是达到给定的最大允许误差或指定点的数目,该判据尤其适用于对重建几何精度要求较高的场合。

### 3 应用实例

以国内某汽轮机厂的大型水轮机叶片作为研究对象,采用摄影测量技术与面扫描技术相结合的方法对其实施检测,扫描获得叶片的点云数据并行预处理,处理完毕的数据与工件 CAD 模型进行比对。叶片模型采集到的原始点云有 200 多万点,使用层次聚类法 1/80 采样后得到的点云为 2.5 万点,与传统三坐标测量机测量工件获得的几百个点相比,可以满足测点数量的要求。三维检测和点云处理过程如图 4 所示。其中图 4(a)表示对叶片进行摄影测量;(b)表示面扫描技术获得点云;(c)表示点云预处理、采样以后得到的最终单幅点云;(d)为在 Geomagic Qualify 中采样后的点云和实际 CAD 数模的吻合度,色谱图标明点云处理技术可以满足工程实践的要求。

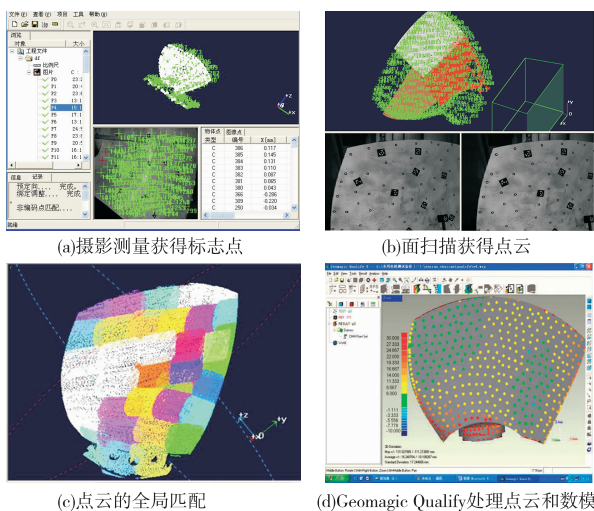


图 4 水轮机叶片的三维检测过程的点云处理

### 4 结束语

a)本文分析了逆向工程中进行数据预处理的必要性,通过点云预处理,数据测量中得到的散乱、粗糙的点云变得光滑、平顺且只有少量杂点,获得的点云大大降低了三维模型重构中的操作难度,为模型的重构打下了良好的数据基础。

b)提出了点云采样时的最终判据  $\Delta(S, S')$ , 该判据在满足高精度、快速度、适简度的原则下以达到给定的最大允许误差或指定点的数目为目标,适用于重建几何精度要求较高的场合。

c)以某大型水轮机叶片为例进行采样和逆向设计建模精度分析,证明了三轴光学检测点云采样方法的正确性和可行性。

#### 参考文献:

- [1] 雷正保. 汽车覆盖件冲压成形 CAE 技术及其工业应用[R]. 长沙:中南大学,2003.
- [2] ZHANG Z, ZHANG D, PENG X. Performance analysis of 3D full field sensor on fringe projection[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2004, 42(3): 341-353.
- [3] 蒋翔. 基于点云三维匹配的缺陷自动识别技术研究[D]. 南昌:南昌大学,2012.
- [4] SON S, PARK H, LEE K H. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(8): 889-897.
- [5] 周伦彬. 逆向非接触测量技术浅析[J]. *中国测试技术*, 2005, 31(5): 25-27.
- [6] 杨占尧,徐起贺,王学让. 基于快速成型的金属树脂模具快速制造技术[J]. *农业机械学报*, 2003, 34(2): 120-123.
- [7] AZERNIKOV S, FISCHER A. Emerging non-contact 3D measurement technologies for shape retrieval and processing[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2008, 3(2): 85-91.
- [8] 张德海,梁晋,郭成,等. 三维数字化尺寸检测在逆向工程中的研究及应用[J]. *机械研究与应用*, 2008, 21(4): 67-70.
- [9] 许晓栋,赵毅,李从心. 结构光测量中多视拼合技术与算法实现[J]. *机床与液压*, 2005(10): 137-140, 173.
- [10] LI Qing-de, GRIFFITHS J G. Iterative closest geometric objects registration[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2000, 40(10-11): 1171-1188.
- [11] 梁新合,宋志真. 改进的点云精确匹配技术[J]. *装备制造技术*, 2008(3): 41-42.
- [12] 王振华,窦丽华,陈杰. 一种尺度自适应调整的高斯滤波器设计方法[J]. *光学技术*, 2007, 33(3): 395-397.
- [13] 李雪威,张新荣. 保持边缘的高斯平滑滤波算法研究[J]. *计算机应用与软件*, 2010, 27(1): 83-84, 120.
- [14] 蔡学森,戴金波,李晓宁. 中值滤波与均值滤波法在条形码去噪中的应用[J]. *长春师范学院学报:自然科学版*, 2008, 27(4): 40-42.
- [15] 张晓强. 散乱点云采样技术研究[D]. 西安:西安交通大学, 2011.

(上接第 945 页)

- [11] CHENTANEZ N, MÜLLER M. Real-time simulation of large bodies of water with small scale details[C]//Proc of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. [S. l.]: Eurographics Association, 2010: 197-206.
- [12] NIELSEN M B, SÖDERSTRÖM A, BRIDSON R. Synthesizing waves from animated height fields[J]. *ACM Trans on Graphics*, 2013, 32(1): 2.
- [13] 李磊,王庆,肖照林. 一种基于视频的水下场景复原算法[J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(1): 188-191, 196.
- [14] RUECKERT D, SONODA L I, HAYES C, et al. Nonrigid registration using free-form deformations; application to breast MR images[J]. *IEEE Trans on Medical Imaging*, 1999, 18(8): 712-721.
- [15] TIAN Y, NARASIMHAN S G. The relationship between water depth

and distortion[R]. [S. l.]: CMU, 2009.

- [16] AGRAWAL A, RASKAR R, CHELLAPPA R. What is the range of surface reconstructions from a gradient field? [C]//Proc of the 9th European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 578-591.
- [17] ANDERSON J D. 计算流体力学基础及其应用[M]. 吴颂平,刘赵森,译. 北京:机械工业出版社,2007.
- [18] BRIDSON R. Fluid simulation for computer graphics[M]. [S. l.]: A K Peters, 2008.
- [19] TIAN Yuan-dong, NARASIMHAN S G. Seeing through water: image restoration using model-based tracking[C]//Proc of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 2303-2310.