基于反射率的多尺度水面重建方法

沈亮^{1,2*}, 王昱哲^{1,2}, 张娟^{1,2}, 朱登明¹, 石敏³

1. 中国科学院计算技术研究所虚拟现实实验室, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206

* 通信作者. E-mail: shenliang@ict.ac.cn

收稿日期: 2016-12-21; 接受日期: 2017-02-04; 网络出版日期: 2017-08-25

国家自然科学基金 (批准号: 61173067, 61379085, 61532002, 61300131) 和国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2015A A016401) 资助项目

摘要 为了生成逼真的水面动画, 以单摄像头拍摄的水面视频作为输入数据, 本文提出一种基于反射率的多尺度水面重建方法. 在传统 SFS 方法的基础上构建了加入反射率条件的模型, 求解整体水面高度场数据, 并利用局部优化算法使得高度场对波浪的拟合更加准确, 得到真实生动水面形态. 针对单帧求解中波浪跳变的问题, 利用浅水方程求解高度场中点的速度信息, 根据各点的速度在时域上对求得的水面动画进行平滑. 最后提出了一种高效实用的波浪翻滚重建算法, 可根据水面实际情况, 利用求得的速度信息和高度场的梯度数据再现波浪的翻滚效果, 使得波浪更加生动. 结果表明, 使用该方法可以得到具有真实感的水面动画视频, 满足各项工业领域用户的需求.

关键词 水面, 重建, 数据驱动, 浅水方程, 反射率

1 引言

水的流体运动是生活中最常见的自然现象, 经常出现在电影、电视和游戏等领域的作品中, 因此流体水面的模拟和合成一直是图形学研究中的一个重要领域. 传统的水面重建方法中, 最早使用的是基于经验模型的建模方法, 通过收集潮汐数据或利用噪声来设置模型, 直接构造水表面形态, 方法较为直观, 计算量较小, 但却也只适用于大规模海面的模拟, 难以再现波浪细节. 之后基于流体物理方程的方法成为主流, 根据水体初始状态和物理方程计算求解水体的各项物理属性, 可以再现高真实感的水体运动, 但是计算量大且耗时长, 对相关参数的设置较为敏感. 当前, 随着各种高精度数据采集设备的便携化, 研究的热点转移到基于数据驱动的水面重建方法上来. 该类方法利用各种传感器设备从自然界中采集数据, 更加符合真实的物理规律, 降低了求解的复杂程度, 提高了效率, 并保证了重建的真实感.

引用格式: 沈亮, 王昱哲, 张娟, 等. 基于反射率的多尺度水面重建方法. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 1369–1380, doi: 10.1360/N112016-00294
Shen L, Wang Y Z, Zhang J, et al. Research on multi-scale reconstruction of water surfaces based on reflectance (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 1369–1380, doi: 10.1360/N112016-00294

本文提出一种新的户外水面重建框架, 基于单摄像头拍摄的户外水面视频, 重建出较为精准的水面高度场数据, 然后根据高度场求解浅水方程, 使得重建的水面在时序上更加连续. 并提出一种高效的波浪翻滚重建算法, 使得重建得到的波浪动画更加生动真实.

2 相关工作

利用拍摄的视频信息构建相关模型进行水体的重建是一个较新且具有广大前景的研究方向. 研究者们也设计了许多不同的重建框架来进行水面动画的重建.

针对室内可控水体的重建方法大多需要进行特别的设计或者对水体进行特殊处理. 在文献 [1,2] 中, 主要利用光线折射的原理, 拍摄水底特定的图案或形状的形变, 建立图像扭曲和水面梯度的折射关系模型, 重建得到水面高度场数据, 但却局限于对浅水的微小波动进行重建. Ihrke 等^[3] 使用荧光物质对水体染色, 利用多台摄像机对水在黑暗的环境拍摄, 通过荧光的强度计算水体厚度, 构造出流体表面. Wang 等^[4] 也事先对水进行染色, 并对液体表面投影特点图案, 使用双目摄像机进行拍摄, 计算得到深度图并根据张力约束和速度场约束进行优化得到重建的表面. Sagawa 等^[5] 向染色后的水体表面投影具有特殊结构的图像, 根据图像的形变来恢复快速变化的表面. 以上 3 种方法都对水面进行了特殊处理, 需要事先进行相关的设计, 步骤繁琐. Gregson 等^[6] 使用了十多台摄像机对水体进行拍摄, 提出一种改进于随机漫步方法的随机层析重建算法, 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. 但也因为需要较多的摄像机同步进行拍摄, 只适用于实验室内的小规模流体重建.

对于室外的大规模水体, 如江河湖海等, 无法对水体进行染色等预处理操作, 因此重建的方法也与之之前不尽相同. Yezzi 等^[7] 使用两台摄像机拍摄海洋表面, 提出一种基于双目视觉的方法对海面进行重建, 结合物理方程, 进行了大量数值计算, 重建精度较高, 但是对设备有要求且计算复杂耗时. 在使用单摄像头拍摄的水面视频作为输入数据的方法中, Pickup 等^[8] 和 Li 等^[9] 主要使用 SFS (shape from shading) 方法获取初始的水面形态, 然后结合光流法或物理方程来追踪水面的速度场, 利用速度信息来优化水面, 重建结果具有较好的视觉逼真度. Quan 等在文献 [10] 中提出用基于物理粒子的方法来重建水面. 该方法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, 并通过基于网格的 Bozeman 方法来求解水面的速度信息, 获得更加准确的速度场结果, 可以对水面流体添加一些场景进行调整和改进. Wang 等^[11] 使用 SFS 方法对水面进行重建, 在经过去噪、填洞及平滑操作后, 对表面及水体进行粒子化, 用于驱动流体模拟.

在重建水面波浪方面, Takahashi 等在文献 [12] 中提出了最早的基于波面造型的方法, 利用波浪飞溅和泡沫模拟的算法, 结合粒子方法和网格方法的优点, 通过对表面曲率进行监控和模拟, 得到水面波浪和泡沫的动画效果. 在文献 [13] 中, Ihmsen 等提出了一种分层的模拟方法. 将水面波浪部分分为飞溅、泡沫和气泡 3 层, 根据其在水上还是水面, 利用物理的速度和压力信息对其进行模拟, 可以较好地表现水面波浪和轮船驶过的泡沫效果. 而在文献 [14] 中, Langlois 等通过跟踪液体和空气交界处的几何形状, 确定气泡的几何形状和分裂拓扑的结构变化, 并结合声音的捕获再现气泡和水面的状态.

以上重建方法中, 对于水面形态的重建大多需要较为精密的实验设计, 对于水体或者设备有一定的要求, 不利于拓展. 同时由于户外水面数据采集更加复杂, 目前基于单摄像机采集数据的户外水面重建的研究还较少, 还有待进一步探索.

3 水面高度场重建

在前人的研究当中, 利用传统的 SFS 方法对水面高度场进行重建, 主要存在着两个问题. 第一, 假

图 1 高度场重建流程图

Figure 1 Height field reconstruction flow chart

设水面为 Lambert 体, 即反射率是统一的. 而这并不符合真实规律, 水面波浪的复杂变化会造成反射率的变化, 反应在拍摄的图像上会有亮度颜色等不同, 这也是重建中非常重要的信息. 第二, 仅通过阴影难以恢复大尺度下的水面形态变化. 因为阴影仅仅表示它和周围相邻点之间的关系, 表现的是细粒度下表面深度变化反应在图像上的差别, 然而大尺度下深度的较为缓慢变化趋势并不会产生明显的阴影, 仅通过阴影进行重建, 可能造成大尺度下水面高度场的变化趋势的不准确.

针对传统方法存在的缺陷, 提出一种基于反射率的多尺度水面高度场求解方法. 建立加入反射率条件的模型, 先全局求解水面的整体流动形态, 然后针对波浪复杂处局部优化, 得到更加准确的高度场数据. 整体流程如图 1 所示.

3.1 基于反射率模型求解水面形态

反射率描述的是物体对垂直入射光线的反射能力, 表示物体表面所能反射的光量和它所接受的光量之比. 为了更加准确地描述自然界中水面的真实状态, 建立重建模型, 目标是希望在输入的视频图像中相同光照条件下, 光线从重建表面投射得到的图像与输入图像之间的误差尽可能的小, 思想与文献 [15] 相似, 重建模型可表示为

$$\max(P(R)P(Z)P(L)), \quad \text{s.t.} \quad I = R \cdot S(Z, L), \quad (1)$$

其中, R 代表水面的反射率, Z 代表高度, L 代表光照的方向数据, I 表示图像中像素的强度, $P(x)$ 函数表示为参数 x 的先验. 重建的目标为找到最大的 $P(R)P(Z)P(L)$ 使得重建图像与输入图像一致. 对式 (1) 求负 $\log$ 函数, 并将约束条件带入, 可得损失函数为

$$\begin{aligned} F_{\text{loss}} &= \min(-\log(P(I/S(Z, L))P(Z)P(L))) \\ &= \min(g(I - S(Z, L)) + f(Z) + h(L)), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $g(R)$, $f(Z)$ 和 $h(L)$ 分别表示反射率、高度场和光照方向的损失函数. 对于原图像中光照方向的估算, 可以通过文献 [16] 中的方法计算得到. 在得到光照方向后, 主要对反射率 $g(R)$ 和高度场 $f(Z)$ 进行建模.

在对刚体重建的研究中, 文献 [15] 考虑到场景中可能存在多种物体和颜色, 对反射率作出 3 个假设, 约束较为严格. 因此针对水面反射特点, 对水面反射率条件作出了两个假设: 首先, 反射率的变化和物体的材质和表面的形态有关, 水面的材质是统一的, 而且水面的形态是连续变化的, 在局部趋向

于平滑, 所以这里假设物体的反射率趋向于平滑变化; 其次, 水面梯度的角度在一定范围之内, 所以提出物体的反射率在一一定的范围之内变化的假设. 结合文献 [15] 可以构建公式为

$$g(R) = \lambda_s \sum_i \sum_{j \in N(i)} c(R_i - R_j; \alpha_R, \sigma_R) - \lambda_e \log \left(\sum_i \sum_{j \in N(i)} \exp \left(\frac{-(R_i - R_j)^2}{4\sigma_R^2} \right) \right), \quad (3)$$

其中 $N(i)$ 是像素点 i 周围 5×5 范围的点, $c(x; \alpha, \sigma)$ 是以均值 α 和方差 σ 为参数的 Gauss 混合尺度模型的负 log 函数:

$$c(x; \alpha, \sigma) = -\log \sum_{j=1}^{40} \alpha_j \mathcal{N}(x; 0, \sigma_j^2). \quad (4)$$

当前, 对于物体形态重建也已有了较多的研究, 如文献 [17, 18]. 本文希望通过全局求解的方法构造水面整体流动形态, 因此使用最基本的假设, 从两个方面构造水面高度场重建模型: 第一, 针对碎玉水面高度场的重建, 水面是连续的, 不会出现悬崖般断层的形态, 所以这里假设高度场局部的变化是平滑的; 第二, 由于水面具有张力, 所以有各向同性的约束, 因此假设水面的法向量趋向于各向同性, 即在局部趋向于球形, 这有助于得到较好的波浪趋势. 结合文献 [17, 18] 有

$$f(Z) = \sum_i \sum_{j \in N(i)} c(H(Z)_i - H(Z)_j; \alpha_k, \sigma_k) - \sum_i \log(\mathbf{N}_i^z(Z)), \quad (5)$$

其中 $\mathbf{N}_i^z$ 表示物体在点 i 处的法向量, $H(Z)_i$ 表示物体在点 i 处的曲率. 参考文献 [19], 该点处的曲率计算如下:

$$H(Z) = \frac{(1 + Z_x^2)Z_{yy} - 2Z_xZ_yZ_{xy} + (1 + Z_y^2)Z_{xx}}{2(1 + Z_x^2 + Z_y^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (6)$$

通过上述函数构建出式 (2) 中的损失函数. 在求解的方法上, 直接使用简单的针对 Z 的梯度下降方法并不能得到很好的求解效果. 因此参考文献 [20] 中的求解思想, 可以将问题描述为优化 $F_{\text{loss}}(X)$, 其中 F_{loss} 为损失函数, X 为变量. 定义 G 为构造成的 Gauss 金字塔, 因为 Gauss 金字塔的构成是一个线性的过程, 因此可以把 G 看作是一个矩阵, 从而最小化 $F'(Y)$ 而不是直接计算, 其中 $X = G^T Y$.

算法 1 水面形态求解优化算法

```

1:  $[l, \nabla Y l] = F'(Y)$ 
2:  $X \leftarrow G^T Y$  // Reconstruct signal
3:  $[l, \nabla Y l] \leftarrow F(X)$  // Compute loss and gradient
4:  $\nabla Y l \leftarrow G \nabla x$  // Backpropagate gradient
```

初始化 Y 为 $\mathbf{0}$ 向量, 然后可以使用 L-BFGS 方法 [21] 进行求解 $X = G^T(\text{argmin } Y F'(Y))$, 如算法 1 所示, 得到水面高度场和反射率的结果.

3.2 波浪细节优化

3.1 小节中可以计算得到大尺度下整体水面波浪趋势的高度场结果, 不过对于较为复杂的水面波浪部分还可以进一步优化, 求解更加准确的结果. 由于反射率的变化和物体本身的性质和物体的形状相关, 因此, 越是平静无波的水面越接近于 Lambert 体表面, 反射率变化越平缓; 而波浪变化复杂的水面, 反射率的变化程度会较为剧烈, 为了减少计算的复杂度, 可以对水面分块, 利用求解得到的反射率结果对图像中波浪复杂的部分和平缓的部分进行快速的区分.

图 2 (网络版彩图) 局部迭代优化效果

Figure 2 (Color online) Optimization result. (a) Input; (b) global result; (c) optimization result

根据输入视频图像中水面波浪的复杂程度设置 M 和 N , 将水面等分成 $M \times N$ 块, 复杂水面情况下 M 和 N 可以设置的相对更大一些. 通过计算分块内反射率的信息熵可以对反射率的变化剧烈程度进行量化, 从而量化该分块内水面的复杂程度. 计算方法如文献 [22], 表示为

$$H_R = - \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} p_{ij} \ln(p_{ij}), \quad (7)$$

其中

$$p_{ij} = \frac{R(i, j)}{- \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} R(i, j)}, \quad (8)$$

表示点 (i, j) 的反射率值 $R(i, j)$ 占图像总反射率值的比值. 信息熵 H_R 反应了图像中反射率的分布信息. 当水面波浪较为复杂, 反射率变化较大, 此时反射率信息量多, 熵值小. 当水面较为平缓, 反射率变化比较平滑, 信息量少, 熵值大.

设置阈值 α , 对于每一个分块求取反射率的熵值后, 当分块的熵值大于 α 不再进行进一步的处理; 当熵值小于 α 时, 可以认为该分块内水面波浪变化较为剧烈, 可以对这部分的高度场进行进一步的优化.

使用局部优化的方法来对波浪部分的高度场进行优化. 考虑每个点与其相邻点的关系, 利用有限差分的方法计算表面法向量, 由于使用相邻点之间的关系, 对于小范围内阴影变化比较敏感, 可以得到更加精确的高度场数据.

如文献 [23] 中定义, 在一定光照方向, 水面上每个点反射得到图像上对应的像素点的强度表示为

$$R(p_{i,j}, q_{i,j}) = \frac{-s_x p_{i,j} - s_y q_{i,j} + s_z}{\sqrt{1 + p_{i,j}^2 + q_{i,j}^2}}, \quad (9)$$

其中 (s_x, s_y, s_z) 为光照方向, p 和 q 可以由高度 Z 以差分的形式表示, 相对于图像 I 中的像素点, 此时目标等式为

$$\min f(Z_{i,j}) = \min(I_{i,j} - R(Z_{i,j} - Z_{i-1,j}, Z_{i,j} - Z_{i,j-1})). \quad (10)$$

设定初始高度 $Z_{i,j}^0$ 为 3.1 小节中求得的高度场数据, 然后使用以下公式进行迭代求解, 可得到每一点的新的结果, 效果如图 2 所示,

$$Z_{i,j}^n = Z_{i,j}^{n-1} + \frac{f(Z_{i,j}^{n-1})}{\frac{d}{dZ_{i,j}} f(Z_{i,j}^{n-1})}. \quad (11)$$

此时, 直接将求得的局部高度场分块融合到上一节中, 全局求解得到高度场中可能存在参差不齐的情况. 为了保证水面整体的统一, 可以利用纹理缝合 [24] 的思想, 来将二者进行平滑的融合. 如图 2

图 3 (网络版彩图) 高度场融合示意图

Figure 3 (Color online) Height field emergence

图 4 (网络版彩图) 水面高度场结果

Figure 4 (Color online) Height field reconstruction. (a) Input; (b) result of (a); (c) input; (d) result of (c)

所示, 对于两个需要融合的分块, 在每个分块的边缘进行对比, 在边缘重合的部分寻求一条差异最小的连接线, 将两个分块缝合为一个整体.

为了最后的缝合, 会事先在每个分块的边缘预留 6~8 个点的重合部分. 如图 3 所示, 对于两个分块的高度场 $B1$ 和 $B2$, 设二者重合的部分为 B^{ov1} 和 B^{ov2} , 重合部分的点 (i, j) 为 $B_{i,j}^{ov1}$ 和 $B_{i,j}^{ov2}$. 为了平滑地使二者合二为一, 需要找到误差值最小的分割曲线, 定义每个重合点的误差为

$$e_{i,j} = (B_{i,j}^{ov1} - B_{i,j}^{ov2})^2. \quad (12)$$

高度场的融合分为 3 步:

- (1) 计算重合处每个点的误差 $e_{i,j}$;
- (2) 按照行数进行遍历, 对于每一点 (i, j) 计算累计误差:

$$E_{i,j} = e_{i,j} + \min(E_{i-1,j-1}, E_{i-1,j}, E_{i-1,j+1}); \quad (13)$$

(3) 找到最后一行中最小的累计误差 E 所在的点为连接线的起始点, 从这个点向前回溯, 找到上一行中与该点相邻的点中累计误差最小的点, 依次向前直到第一行. 连接这些点得到两分块的连接线, 即可完成对分块的高度场的缝合, 得到整体高度场数据.

图 4 显示了水面高度场的重建结果. 图 4(a) 和 (c) 显示的是作为输入图像的水面拍摄图像, 图 4(b) 和 (d) 显示的是由重建算法得到的对应高度场数据渲染出的图像结果.

4 波浪翻滚重现

对高度场的求解的算法中, 主要针对于单帧进行计算, 因此在帧与帧之间可能出现高度场的跳变, 造成重建波浪动画不够连贯, 本节将首先针对这一问题进行优化. 同时, 在使用高度场表现流体波浪时, 由于每个点只能有一个高度数据, 无法再现波浪翻滚的现象. 为了加强重建的真实感, 提出了一种

图 5 波浪翻滚重建流程图

Figure 5 Water wave reconstruction flow chart

利用速度信息和高度场关系, 再现波浪翻滚效果的算法. 利用三角网格来构造波浪翻滚, 得到更加具有真实感的水面动画. 主要的算法流程图如图 5 所示.

4.1 利用浅水方程平滑水面

浅水方程是考虑到水流运动中的一种较为独特的情况下满足的方程. 因为在进行波浪模拟时, 波浪水平尺度上的运动强度远大于垂直运动相对于水的深度的强度, 通常相差两个数量级以上. 所以一般情况下, 波浪模拟中水平尺度运动起主要的作用, 垂直方向的运动几乎可以忽略不计, 而且此时水中的密度变化不是很大, 此时水面满足的方程为浅水方程

$$f(u, v, z) = z_t + z_x u + z_y v + z(u_x + v_y). \quad (14)$$

在文献 [9] 中, Li 等使用浅水方程对高度场进行拟合, 求得每个点的速度数据. 利用同样的方法来求解浅水方程, 方程加入了平滑作用正则项后, 构建的能量函数为

$$E = \iint (z_t + z_x u + z_y v + z(u_x + v_y))^2 + \alpha^2 (|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2) dx dy. \quad (15)$$

该方程的求解是通过时间上相邻的两帧来进行的, 可以通过两帧间各点的高度场的变化, 来求取 z 在 x 和 y 方向上的偏导数. 通过求解上式的联合 Euler-Lagrange 等式, 可以构造一个线性的求解方法进行迭代的求解, 最终获得当前帧的速度场信息.

在前文对于高度场的求解的算法中, 主要针对单帧进行计算, 因此在帧与帧之间可能出现高度场的跳变, 造成重建波浪动画有不够连贯的感觉. 此时可以根据浅水方程求得的速度结果, 在时序上对相邻两帧的高度场进行平滑, 计算的方法为

$$Z_{\text{tar}}(t) = Z_{\text{rec}}(t-1) + f(u(t), v(t), w(t)), \quad (16)$$

其中 $Z_{\text{tar}}(t)$ 表示在时间 t 上高度场平滑后的结果, 计算方法是在原有的高度场基础上, 利用浅水方程求得速度 $u(t)$, $v(t)$ 和 $w(t)$, 根据式 (14) 计算得到其依照浅水方程变化的高度 Z_t , 使得高度场的变化符合浅水方程的约束. 这样用速度场对高度场做调整之后, 可以使得两帧之间波浪的过度更加自然, 具有更好的真实感.

4.2 波浪翻滚重建

4.1 小节中重建得到的水面形态数据由高度场来进行表示, 每个采样点只拥有一个高度数据, 因此无法再现水面翻滚这样的复杂水面现象, 本节提出了一种快速有效的波浪翻滚重建方法, 可根据实际情况再现波浪翻滚效果, 提升重建动画的真实感.

波浪翻滚产生的原因是波峰位置的水流速度和下层水流的速度存在较大差值, 波峰的水体才会飞溅翻滚下来. 因此在对于波浪翻滚的重现中, 首先需要确定波浪波峰的位置. 分水岭算法^[25]是一种基

图 6 (网络版彩图) 分水岭算法分割波浪

Figure 6 (Color online) Watershed algorithm result. (a) Input; (b) intermediate result of watershed algorithm; (c) optimization result

图 7 (网络版彩图) 波浪翻滚重建流程

Figure 7 (Color online) Water wave reconstruction. (a) Input; (b) candidate points for water wave; (c) result

于拓扑理论的数学形态学的分割方法, 将求解的高度场作为输入数据, 利用该算法思想可以对波浪的位置进行初步的定位, 如图 6 所示, 将波浪部分和较为平缓的水面部分进行划分。

如图 6(c) 所示, 其中白色部分为波浪较为剧烈的部分, 在这部分中可以找到可能产生波浪翻滚的位置。图 7 展示波浪重建的基本流程。通过第 3 节重建得到的水面高度场 (图 7(a)), 对于可能产生波浪翻滚的点, 通过求取各点的梯度值可以找到范围内局部凸起的高点 P_c , 这些点是重建的候选位置 (图 7(b))。由于波浪翻滚的产生还与波峰位置的速度和下层水面的速度差值相关, 设定阈值 α , 计算候选位置点 P_c 与该点速度方向上高度场梯度拐点处的速度差, 大于阈值 α , 则认为该位置应该产生波浪的翻滚 (图 7(c))。

此时得到的目标点大多呈现出线的状态, 表示波浪在这条线上应该会产生翻滚的效果。不过不同区域中, 这些线可能会有中间断开的情况存在。因为用浅水方程拟合得到的速度准确性并不能得到百分之百的保证。为了保证结果的连续性, 若存在非常靠近的两个目标点区域, 同时两个目标点的距离小于两倍网格长度时, 那么将这两条波浪线连接起来, 这样可以得到更加平滑的效果。

由于高度场在表示水面形态上有局限性, 波浪翻滚处主要使用三角网格来进行表示。在波浪脊线处利用抛物线方程可以计算得到波浪抛飞的高度:

$$y = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2, \quad (17)$$

其中速度 v_0 是通过浅水方程计算得到的速度数据, 时间数据 t 可以根据拍摄视频中的帧率计算得到。不过此时得到的只是一个波浪抛飞的面数据, 还不具有厚度, 为了使得波浪的表示更加的真实, 通过添加一个水面厚度来完善波浪的形态:

$$x' = x + p_m \mathbf{n}, \quad (18)$$

表 1 误差对比数据
Table 1 Error comparison

Key frame	Li et al. [9]	Ours
Frame 1	0.0626	0.0431
Frame 10	0.0535	0.0472
Frame 20	0.0563	0.0489
Frame 30	0.0472	0.0398

其中 x' 表示为波浪抛飞的面下层添加的一层数据点集, 通过设定参数 p_m 来为波浪下层添加一层, 并利用三角网格进行连接, 可以使得波浪的翻滚处具有厚度, 显得更加具有真实感, 得到最终的水面重建模型.

5 结果分析

5.1 重建高度场数据分析

对 Dyntex 数据库 [26] 中的水面波浪场景进行实验, 通过 Matlab 进行计算, 重建每帧所需时间为分钟级, 与 Li 方法 [9] 耗时级别相近. 为了对算法重建的高度场精度进行评估, 这里通过使用 Pentland 在文献 [27] 中的投影函数来对得到的高度场进行投影, 构造拍摄角度的灰度图像, 从而与输入的图像进行对比来进行更加准确的定量分析:

$$I(x, y) = R(p, q) = \frac{\cos\sigma_s + p\cos\tau_s\sin\sigma_s + q\sin\tau_s\sin\sigma_s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}, \quad (19)$$

其中 p 和 q 表示表面 x 和 y 方向上的梯度, τ_s 表示光源的倾角, σ_s 表示光源的俯仰角. 用该公式计算已知高度场表面在输入角度的投影图像, 将得到的投影图像的每个像素值进行归一化后与原始图像的灰度图进行比较, 获得每个点平均误差用来表示重建的精准度, 与文献 [9] 中算法的对比结果如表 1 所示. 通过对比可以看出, 利用新的投射函数得到的输入数据视角一致的图像中, 该方法所得到的结果更加的准确, 能更好地展现输入视频中波浪的效果, 可以说明用该方法进行求解能够得到更加具有真实准确的高度场数据.

5.2 动画时序上平滑结果分析

在第 4 节中, 利用浅水方程对水面动画在时序上进行了平滑, 优化动画的效果, 使得波浪的移动更加的连贯自然. 为了量化高度场在时序上平滑的效果, 定义帧与帧之间的连贯系数为

$$S = \log \sum |z_i(t) - z_i(t-1)|, \quad (20)$$

S 表示帧与帧之间高度场变化的剧烈程度, 若较高可能会造成水面动画的不连贯. 同样在 Dyntex 数据库 [26] 中的波浪场景进行实验, 得到平滑前和平滑后的对比如表 2 所示.

可以看到该方法使得帧与帧之间高度场的变化更加平滑, 能更好避免帧之间的跳变. 使用拍摄的视频图像作为纹理进行渲染, 如图 8 和 9 可以得到具有真实感的水面波浪和瀑布的动画, 能够再现水面的各种细节和动态. 在图 8 和 9 中, 对输入图像和对应的重建水面渲染图进行了分组展示, 左边小图为输入的水面拍摄图像, 右边小图为通过本文算法得到的渲染图像.

表 2 平滑度对比数据
Table 2 Frame smooth comparison

Key frame	Before smooth	After smooth
Frame 1	9.373	9.007
Frame 10	9.797	9.124
Frame 20	9.604	8.979
Frame 30	9.543	9.012

图 8 (网络版彩图) 瀑布重建结果
Figure 8 (Color online) Waterfall reconstruction results

图 9 (网络版彩图) 波浪翻滚重建
Figure 9 (Color online) Water wave reconstruction results

6 结束语

提出了一种新颖的水面动画重建方法. 以单摄像机拍摄的水面视频作为输入条件, 针对原有 SFS 方法的缺陷, 加入反射率条件重建得到更加准确的波浪趋势, 然后利用细节优化的算法加强波浪细节信息, 得到更加准确的高度场数据. 然后利用浅水方程, 在时域上对高度场进行平滑, 使得重建的动画更加生动自然. 对于高度场数据无法再现水面翻滚效果的缺点, 设计了一种波浪翻滚重建算法再现波浪的翻滚效果. 实验表明, 提出的方法能够很好地展现水面波浪的形态, 不过当前的系统的重建效率还有进一步提高的空间, 同时对于某些水滴飞溅的复杂波浪形态没有办法进行重建, 还有待更深入地研究.

参考文献

- 1 Murase H. Surface shape reconstruction of a nonrigid transparent object using refraction and motion. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1992, 14: 1045–1052
- 2 Morris N J W, Kutulakos K N. Dynamic refraction stereo. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2011, 33: 1518–1531
- 3 Ihrke I, Goidluecke B, Magnor M. Reconstructing the geometry of flowing water. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, Beijing, 2005. 1055–1060
- 4 Wang H, Liao M, Zhang Q, et al. Physically guided liquid surface modeling from videos. *ACM Trans Graph*, 2009, 28: 90–99
- 5 Sagawa R, Kawasaki H, Kiyota S, et al. Dense one-shot 3D reconstruction by detecting continuous regions with parallel line projection. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, Barcelona, 2011. 1911–1918
- 6 Gregson J, Krimerman M, Hullin M B, et al. Stochastic tomography and its applications in 3D imaging of mixing fluids. *ACM Trans Graph*, 2012, 31: 1–10
- 7 Yezzi A, Bonet G G. Variational image processing algorithms for the stereoscopic space-time reconstruction of water waves. Dissertation for Ph.D. Degree. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2011
- 8 Pickup D, Li C, Cosker D, et al. Reconstructing mass-conserved water surfaces using shape from shading and optical flow. In: *Proceedings of Asian Conference on Computer Vision*, Queenstown, 2010. 189–201
- 9 Li C, Pickup D, Saunders T, et al. Water surface modeling from a single viewpoint video. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2013, 19: 1242–1251
- 10 Quan H Y, Wang C B, Song Y H. Fluid re-simulation based on physically driven model from video. *Vis Comput*, 2017, 33: 85–98
- 11 Wang C, Wang C, Qin H, et al. Video-based fluid reconstruction and its coupling with SPH simulation. *Vis Comput*, 2016, doi:10.1007/s00371-016-1284-2
- 12 Takahashi T, Fujii H, Kunimatsu A, et al. Realistic animation of fluid with splash and foam. *Comput Graph Forum*, 2003, 22: 391–400
- 13 Ihmsen M, Akinci N, Akinci G, et al. Unified spray, foam and air bubbles for particle-based fluids. *Vis Comput*, 2012, 28: 669–677
- 14 Langlois T R, Zheng C, James D L. Toward animating water with complex acoustic bubbles. *ACM Trans Graph*, 2016, 35: 95–107
- 15 Barron J T, Malik J. Shape, illumination, and reflectance from shading. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2015, 37: 1670–1687
- 16 Yang J, Deng Z P, Guo Y K, et al. Two new approaches for illuminant direction estimation. *J Shanghai Jiaotong Univ*, 2002, 36: 894–896 [杨杰, 邓志鹏, 郭英凯, 等. 两种新的光照方向估计方法. *上海交通大学学报*, 2002, 36: 894–896]
- 17 Huang J, Lee A B, Mumford D. Statistics of range images. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Hilton Head Island, 2000. 324–331
- 18 Woodford O, Torr P, Reid I, et al. Global stereo reconstruction under second-order smoothness priors. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2009, 31: 2115–2128
- 19 Besl P J, Jain R C. Segmentation through variable-order surface fitting. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1988, 10: 167–192
- 20 Terzopoulos D. Image analysis using multigrid relaxation methods. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1986, 2: 129–139
- 21 Liu D C, Nocedal J. On the limited memory BFGS method for large scale optimization. *Math Program*, 1989, 45: 503–528
- 22 Liu Y X, Su X Q, Wang P. Image matching based on local projection entropy. *Acta Photonica Sin*, 2004, 33: 105–108 [刘雅轩, 苏秀琴, 王萍. 一种基于局部投影熵的图像匹配新算法. *光子学报*, 2004, 33: 105–108]
- 23 Ping-Sing T, Shah M. Shape from shading using linear approximation. *Image Vis Comput*, 1994, 12: 487–498
- 24 Efros A A, Freeman W T. Image quilting for texture synthesis and transfer. In: *Proceedings of ACM Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Los Angeles, 2001. 341–346
- 25 Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1991, 13: 583–598

- 26 Peteri R, Fazekas S, Huiskes M J. DynTex: a comprehensive database of dynamic textures. *Pattern Recog Lett*, 2010, 31: 1627–1632
- 27 Pentland A. Shape information from shading: a theory about human perception. *Spat Vis*, 1989, 4: 165–182

Research on multi-scale reconstruction of water surfaces based on reflectance

Liang SHEN^{1,2*}, Yuzhe WANG^{1,2}, Juan ZHANG^{1,2}, Dengming ZHU¹ & Min SHI³

1. *Virtual Reality Laboratory, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*
 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
 3. *School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*
- * Corresponding author. E-mail: shenliang@ict.ac.cn

Abstract Aimed at reconstructing vivid water animations, we present a multi-scale reconstruction framework based on reflectance using video from one camera as input data. Based on traditional the shape from shading method, we build our reflectance model to reconstruct large-scale wave trend information. We then use a local algorithm to reconstruct the details of waves. By combining the two results, we can construct a more accurate height field for the water surface. To solve the problem of unsmoothed animation frames, we use shallow water equations to calculate the velocity field of the water surface. We then optimize the flatness between frames using velocity data. Finally, we propose an efficient algorithm for the reconstruction of wave tumbling based on the gradient of the height field and speed of the water surface. Results demonstrate that our method can effectively synthesize large-scale water animations with a high sense of reality, which meets user demands in many industries.

Keywords water surface, reconstruction, data-driven, shallow water equation, reflectance

Liang SHEN is a Ph.D. candidate at the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. He received his B.S. degree in Computer Science from the China University of Geosciences, Wuhan, China. His main research interests are fluid reconstruction and computer vision.

Yuzhe WANG was born in 1991. He received his Master's degree from the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. He received his Bachelor's degree from the Beijing University of Posts and Telecommunications. His main research interest is fluid reconstruction.

Juan ZHANG was born in 1991. She received her Bachelor's degree in Computer Science from the Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, in 2014. She is currently a Master's degree candidate at the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. Her research interests include fluid simulation and computer graphics.

Dengming ZHU received his Ph.D. degree from the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences in 2009, where he is currently working as an associate professor. His main scientific interests are fluid simulation, parallel visualization, and virtual reality.