

8-13-2020

Dynamic Water Surface Simulation Based on Secondary Reflection Mapping

Li Hua

1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;;2. National Local Combined Engineering Research Center of Special Film Technology and Equipment, Changchun 130000, China;

Huamin Yang

1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;;2. National Local Combined Engineering Research Center of Special Film Technology and Equipment, Changchun 130000, China;

Feng Xin

1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;;2. National Local Combined Engineering Research Center of Special Film Technology and Equipment, Changchun 130000, 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.

Dynamic Water Surface Simulation Based on Secondary Reflection Mapping

Abstract

Abstract: In order to improve the effects of dynamic water surface simulation, a method was proposed which *utilized 3D mesh modeling water surface and was optimized by projective grid method*; A mirror image of the subject above the water was generated which was called the first reflection map; then the *simplified Navier-Stokes equation was enforced onto the first texture mapping*. The reflection and refraction was calculated to form a secondary reflection map with respect to the perspective mapping coordinate; Perspective texture mapping was enforced to water surface to achieve fast simulated water surface. Experimental test shows that the approach can simulate the dynamic water surface fastly with high quality. This method is suitable for precise observation of water surface and more than 30FPS frame rate can be achieved.

Keywords

Navier-Stokes, water surface simulation, reflection, refraction, reflection mapping

Recommended Citation

Li Hua, Yang Huamin, Feng Xin. Dynamic Water Surface Simulation Based on Secondary Reflection Mapping[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2519-2526.

基于二次反射映射的动态水面模拟

李华^{1,2}, 杨华民^{1,2*}, 冯欣^{1,2}

(1. 长春理工大学计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022;

2. 特种电影技术及装备国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130000)

摘要: 为提高动态水面的模拟效果, 提出利用 3D 网格建模, 通过投影网格技术进行优化, 生成水面以上物体的镜面映像, 构成一级反射映射图; 简化纳维-斯托克斯方程, 将生成的高度值与映像后的纹理叠加, 根据透视纹理映射坐标计算表面反射与折射, 构成二级反射图; 最后, 将二级反射图进行透视纹理映射渲染到水面, 实现水面反射和折射的快速模拟。测试实验表明, 算法能快速、高真实感的模拟动态水面, 适合对近距离物体的水面精确观察, 渲染帧率可达到 30FPS 以上。

关键词: Navier-Stokes; 水面模拟; 反射; 折射; 反射映射

中图分类号: TP391.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 10-2519-08

Dynamic Water Surface Simulation Based on Secondary Reflection Mapping

Li Hua^{1,2}, Yang Huamin^{1,2*}, Feng Xin^{1,2}

(1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. National Local Combined Engineering Research Center of Special Film Technology and Equipment, Changchun 130000, China)

Abstract: In order to improve the effects of dynamic water surface simulation, a method was proposed which utilized 3D mesh modeling water surface and was optimized by projective grid method; A mirror image of the subject above the water was generated which was called the first reflection map; then the simplified Navier-Stokes equation was enforced onto the first texture mapping. The reflection and refraction was calculated to form a secondary reflection map with respect to the perspective mapping coordinate; Perspective texture mapping was enforced to water surface to achieve fast simulated water surface. Experimental test shows that the approach can simulate the dynamic water surface fastly with high quality. This method is suitable for precise observation of water surface and more than 30FPS frame rate can be achieved.

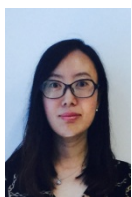
Keywords: Navier-Stokes; water surface simulation; reflection; refraction; reflection mapping

引言

水是自然界中普遍存在的物质, 随着图形硬件和虚拟仿真技术的发展, 越来越多的应用需要模拟水面的各种现象, 尤其是在电影、动漫、游戏及

科学模拟中。但由于水体运动的特殊性使得水面模拟的计算复杂性很高, 且对水面的不同观察角度和观察距离计算差别也非常大; 另外, 由于水面运动的随机性, 使得水面的光照和反射、折射等计算非常复杂, 很难达到交互式应用的要求。因此, 水的模拟一直是图形学研究的主要内容。

水的模拟可以大致分为两类, 一是运动状态模拟, 即水流、飞溅、倾倒等。此类模拟需要建立物理模型, 通过物理正确的运动仿真实现。二是水面模拟, 包括水面的水波纹, 水面倒影, 光照反射



收稿日期: 2016-05-10 修回日期: 2016-07-14;
基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(20140204050GX, 20140204009GX); 吉林省重点科技成果转化项目(20130303011GX); 长春市重大科技攻关计划(14KG008); 吉林省省级产业创新专项资金(2016C091);
作者简介: 李华(1977-), 女, 黑龙江北安, 博士生, 副教授, 研究方向为真实感绘制及虚拟现实。

<http://www.china-simulation.com>

• 2519 •

等。本文的研究工作针对第二种类型，即水的表面真实感模拟。提出一种快速的高质量动态水面模拟算法，该方法生成一个用于透视投影贴图的二级反射映射图(Secondary Reflection Map, SRM)，该 SRM 是通过一级反射映射图与简化的纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes, NS)建立的水表面法向量信息叠加而成。SRM 包含了复杂的动态水面的反射及折射信息，通过透视投影贴图渲染到水面。本方法的主要贡献为：1. 简化 Navier-Stokes 方程生成动态水表面信息。2. 创建二级反射映射图，利用透视投影将纹理映射到水面。

1 相关工作

由于水体的运动在自然界中具有随机性，尽管真实感的水面模拟技术已研究多年，但多是基于离线的渲染或者是简单的光照效果加上纹理映射技术，大部分实时应用均忽略了水面复杂的反射和折射现象。在计算机图形学领域，水体表面建模可以分为三大类：第一类为粒子系统，粒子系统通过基本粒子的物理运动构成水的整体运动模型^[1]，每个基本粒子都被赋予反射和折射的属性，粒子系统计算复杂、耗时，只能离线及并行计算实现，主要用来模仿水的下落，发散及运动撞击效果，得到的运动效果逼真，R. Elliot^[2]提出了基于 Chimera 网格的物理正确的水运动模拟，M. Viñas 等^[3]利用多核 GPU 技术模拟浅水仿真；另外，基于物理学的水域建模研究^[4-5]对近几年的研究方法进行了详细分析。第二类通过波的累加形式实现，如 Tessendorf 等^[6]和 Chiu 等^[7]提出的利用快速傅里叶变换模拟水域表面运动，该方法将水波看作在坐标平面上的时间函数，因此将高度值看作不同振幅和周期的正弦波求和。Premoze 等^[8]和 Hinsinger^[9]提出改进的波形累加合成方法。第三类通过建立 2D 或 3D 均匀网格建模并结合优化方法实现，层次细节(Level-of-Detail, LoD)模型^[10]提出对网格分辨率进行细分，该方法与几何 Mip-mapping 技术相似，主要对近观察者区域细分成高分辨率的网格，对

远离观察者的区域保留低分辨率的网格；投影网格技术^[11]，提出根据透视投影的原理，将均匀分布的网格透视投影到平面后，再覆盖原有的网格坐标。该方法能够确定更加符合观察习惯的网格细分方案；Yang 等^[12]提出利用动态二叉树方法细分网格；Hu 等^[13]提出一种近平面和远平面块区分法，对不同块区采用不同的网格分辨率，并结合纹理贴图实时的模拟水面反射和折射效果。Nuttapong 等^[14]提出基于混合网格的 GPU 加速技术，实现了大规模三维液体的实时模拟，该方法能使液体适合各种地表结构，且渲染帧率达到了 30FPS。在建模的基础上，动态水的面运动模拟方面有很多优化算法：相干噪声—柏林噪声，利用伪随机函数生成连续的水面梯度，来对水体的随机高度运动进行模拟。一般多倍频累加的柏林噪声形式更接近自然现象^[15]；Navier-Stokes 方程^[16]通过计算流体物质的分子之间的相互作用力，描述作用于液体任意给定区域里的动态平衡，该方法能生成科学准确的动态水面，但计算非常复杂。Wang Y 等^[17]提出一种并行 Navier-Stokes 方程的计算方法，提高了计算效率。在水面光照及交互模拟方面，早期的水面模拟主要运用简单的光照效果^[18-20]；凹凸贴图可以实现一种快速模拟效果，但是仅限于大规模水域、远距离的观察以及静态场景；Eric Bruneton 等^[21]提出基于实时真实感海洋表面光照效果模拟方法；Chris^[22]提出一种有效的反射计算理论，这些方法主要关注交互式水面的光照计算，如夕阳等；Ben 等^[23]提出一种基于 DUDV 的凹凸贴图技术，该方法没有考虑物理正确性计算；本文避开水面交互及运动的复杂讨论，重点关注表面反射的视觉效果。首先利用均匀 3D 网格建模，用投影网格技术进行优化，通过反射映射图与简化的 Navier-Stokes 公式相结合，生成二级反射映射图，实现快速表面反射模拟。

2 水域表面模拟

2.1 水面建模及优化

水面建模有多种方法，最常见的是均匀网格，

在此基础上进行优化,使其满足计算成本和观察的精细要求。本算法首先建立 3D 均匀网格模型,利用投影网格思想^[11],对均匀网格进行优化,生成基于观察位置坐标的透视投影网格。投影网格基本原理如图 1 所示。从观察坐标位置望向水面,网格分辨率随着观察距离和角度的不同满足透视投影的特征。在图 1(左)中,如果将箭头所指的网格平面看成透明网格小孔,则光线透过网格小孔在平面的成像大小呈现规律性变化。

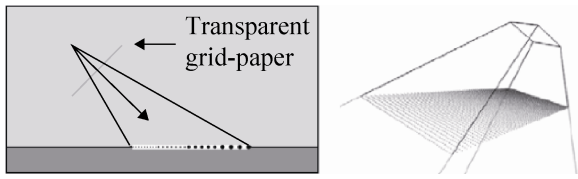


图 1 投影网格基本原理^[9]

利用该属性,将均匀分布的网格透视投影到平面后,再覆盖原有的网格坐标(图 1 右),使得网格分辨率和观察角度之间的关系满足公式(1):

$$R_i' = \frac{R}{kd_i \cos \theta_i} \quad (1)$$

其中: R 为均匀网格分辨率, R_i' 为第 i 行网格分辨率, θ_i 为视线与投影平面方向量夹角, d_i 投影点与视点的距离, k 为常数。

2.2 水面运动模拟

2.2.1 纳维-斯托克斯方程

纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes, NS),以下简称 NS,用来描述液体的运动,其计算流体物质的分子之间的相互作用力,描述作用于液体任意给定区域里的动态平衡。该方程由牛顿第二定律推导得来。NS 方程寻求建立所研究的变量的变化率或通量之间的关系。从数学角度讲,这些变化率相当于变量的导数。使用该方程需进行如下假设: 1. 流体是连续的,强调流体内部不包含空隙; 2. 所有涉及到的场,全部是可微的。NS 方程的动量守恒可以描述为公式(2):

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

其中: v , u 和 w 分别为 x , y , z 方向的速度; p 为局部压力; g 为重力。且 ν 表示了流体的运动粘度。该方程的计算相当复杂,尤其对于粒子系统,需要考虑每个粒子的运动参数,在本文中,由于只考虑水面的随机状态模拟,因此算法将简化 NS 方程。

设水表面区域 $L_x \times L_y$, 且基本网格数量为 $M \times N$ 。因此水域表面的每个基本单元表示为一个高度值。设每个基本单元的高度为 h , 即沿 y 轴方向每个 3D 网格体的中心点高度值。定义局部海拔高度的变化为局部水流速度在单位时间 t 内的变化,如公式(3)所示:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = w - u \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) - v \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (3)$$

在所提到的两个假设前提下,NS 方程给出了所有动量交换的可能性。但是由于计算复杂,本算法假设水的表面张力和密度均匀,因此纳维-斯托克斯方程可以进一步表示为公式(4)-(6):

$$h(x, y, t) = \iint \bar{h}(k_x, k_y, t) \exp\{i(k_x x + k_y y)\} dk_x dk_y \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{h}(\vec{k}, t) &= \bar{h}_0(\vec{k}) \exp\{-i\omega_0(\vec{k})t\} + \\ &\bar{h}_0^*(-\vec{k}) \exp\{i\omega_0(\vec{k})t\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\omega_0(\vec{k}) = \sqrt{g|\vec{k}|} \quad (6)$$

其中: $h(x, y, t)$ 表示水面一点 $p(x, y)$ 在 t 时刻的高度; $\bar{h}(\vec{k}, t)$ 表示 $h(x, y, t)$ 的空间频谱; $\vec{k}=(k_x, k_y)$ 表示二维波向量。

对于网格数量为 $M \times N$ 的表面,方程(4)和(6)可数字化表示为公式(7)和(8),为了提高计算效率,可利用 2D 快速傅里叶变换(FFT)转换成空间频谱计算。

$$h_{FFT} = (x, y, t) = \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \bar{h}(\vec{k}, t) \exp\{i(k_x x + k_y y)\} \quad (7)$$

$$\text{且} \quad \begin{cases} k_x = 2\pi m / L_x, m \in [-M/2, M/2] \\ k_y = 2\pi n / L_y, n \in [-N/2, N/2] \end{cases} \quad (8)$$

公式(5)可转换为变形的 Phillips 频谱进行求解, 即利用 Phillips 频谱的平方简化计算, 如公式(9)和(10):

$$\bar{h}_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\xi_r + i\xi_i)\sqrt{p_h(\bar{k})} \quad (9)$$

$$\sqrt{p_h(\bar{k})} = A \frac{\exp(-1/(|\bar{k}|L)^2)}{|\bar{k}|^4} |\bar{k} \cdot \bar{\omega}|^2 \quad (10)$$

其中: ξ_r 和 ξ_i 是均值为 0、方差为 1 的高斯值。A 为随机振幅, $\bar{\omega}$ 为风矢量, 为了简化运算, 本文设 $\bar{\omega}$ 为常数。尽管如此, NS 方程的求解仍然非常复杂, 也是数学物理研究领域的主要内容, 近几年提出了几种基于 GPU 架构的有限元求解方案; 预测投影方法^[24]利用时间插值将原始 NS 方程转换为亥姆霍兹方程和泊松问题, 使方程得以数字化; 在此基础上 Yu 等^[25]提出一种基于混合 CPU/GPU 系统的并行算法。由于本文主要关注表面的反射效果, 不考虑液体压力变化以及来自某个方向的风速变化等自然因素的影响, 所以本文在该混合 CPU/GPU 系统解决方案的基础上, 假设风和压力都是均匀的, 更进一步简化了 NS 方程计算。

2.2.2 二次反射映射图

反射映射技术是一种高效的预计算纹理方法, 一般用来存储被渲染物体周围环境图像, 通过贴图的方式映射到物体表面, 其实现方法主要有两种: 一是标准环境映射, 运用球体来存储环境信息; 二是立方环境映射, 运用立方体的六个表面存储环境信息, 该方法效率高, 模拟逼真。对光滑表面的镜面反射模拟常常可以取代光线跟踪技术。本文提出的二次反射映射图算法, 是一种反射映射技术的改进, 该方法首先生成待渲染物体的基于介质界面的镜面反射并存储为纹理。然后将计算得到的 h_{FFT} 作用于平面法向量, 通过法向量的叠加计算, 生成每一帧水面高度状态值。最后, 将叠加后的信息存储成二次反射映射图。由于对每一帧都需要产生高度

值, 将严重影响算法的效率, 无法体现算法优越性, 因此, 设置每 m 帧共享同一个纹理贴图。这在连续的表面模拟中是难以察觉的。设 P_{SRM} 为最后渲染到水面的二次反射映射图, 本算法利用快速傅里叶变换计算频域高度值:

$$P_{SRM} = P_{plane} + h_{FFT} \cdot N_{plane} \quad (11)$$

其中 P_{plane} 和 N_{plane} 为经过一级镜面映像的纹理。

3 表面折射与反射计算

3.1 斯涅尔定律(Snell's law)

为了在片段着色器中获取颜色, 首先通过读取 P_{SRM} 中表面任意一点坐标, 计算其法向量: 设表面一点 p , 分别查找 p 在水平和垂直方向(X 方向和 y 方向)的相邻纹理高度值, 根据高度值分别计算其在 x 和 y 方向的正切值, 获得双向的法向量 \bar{n}_x 和 \bar{n}_y , 因此, p 点单位化法向量 \bar{n} 如公式(12)所示。根据 p 法向量值, 利用斯涅尔定律计算不同介质的界面上光的折射和反射, 如图 2 所示:

$$\bar{n}_p = \text{normalize}(\bar{n}_x \times \bar{n}_y) \quad (12)$$

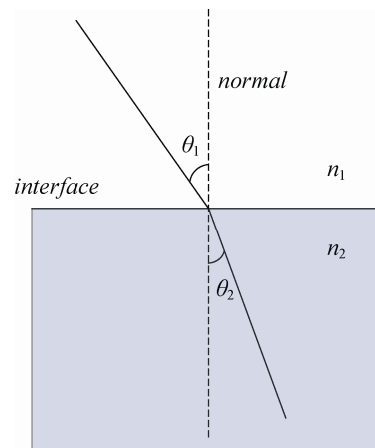


图 2 表面折射与反射示意

其中: n_1 和 n_2 是两个介质的折射率, 本文中分别是空气和水, θ_1 和 θ_2 分别是入射光和折射光与界面法向量的夹角。当 $n_1 = n_2$ 时, 即为反射情况, 此时满足公式(13), 且反射计算公式如(14)所示:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (13)$$

$$V_{reflect} = l + 2 \cos \theta_1 n \quad (14)$$

$$\text{由于 } \sin \theta_2 = \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \sin \theta_1 \quad (15)$$

根据公式(13)则,

$$\sin \theta_2 = \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \sqrt{1 - (\cos \theta_1)^2} \quad (16)$$

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - (\sin \theta_2)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (1 - (\cos \theta_1)^2)} \quad (17)$$

因此折射计算公式如(18)所示:

$$V_{refract} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right) l + \left(\left(\frac{n_1}{n_2} \right) \cos \theta_1 - \cos \theta_2 \right) n \quad (18)$$

其中: n 为表面单位法向量; l 为入射光线单位向量。每帧 P_{SRM} 的数据包括单元网格高度和梯度。对于表面上基本单元网格点, 通过上述方法计算其 2D 表面斜率, 并计算该点的 $V_{reflect}$ 及 $V_{refract}$ 值。

3.2 光照计算

算法结合 Phone 光照模型, 当光线 L 与物体表面相交于一点 P 时, 分别计算该点的环境光光强 I_e , 镜面反射的光强 I_s 和漫反射的光强 I_d 构成, 将三部分光强相加, 如公式(19)所示:

$$I_p = I_e + I_s + I_d \quad (19)$$

其中: 环境光强 $I_e = k_e I_{in}$, k_e 为环境光反射系数。镜面反射光强 $I_s = k_s I_s^{in} (\cos \varphi)^i$, k_s 为镜面反射系数, 其值取决于表面和光的波长, I_s^{in} 是从光源发射的入射光。漫反射的光强 $I_d = k_d I_d^{in} \cos \theta$, 其中 θ 为入射光线与法向量的夹角, k_d 为漫反射系数, I_d^{in} 为光源发射的入射光; 方向光源的阴影计算能增强模拟结果的真实感, 在特定的环境下, 水面物体会生成阴影。为了模拟这种效果, 本算法利用阴影图算法检测光源到物体边缘投射的轮廓, 快速实现物体自阴影和水面阴影绘制。

阴影图算法是目前实时阴影绘制的主要手段, 其特点是绘制效率独立于场景的复杂性, 灵活性强。该方法有由两个渲染通道构成, 首先生成光源视角的场景可见点深度值, 在 z -buffer 中存储为纹理; 然后在相机视角逐像素的测试采样点深度。另外, 由于水面的透明特性, 部分阴影会被水面吸收,

表现出透明的效果, 因此在深度测试的基础上, 设置一个亮度调节参数 m , 能够有效的保证生产的阴影更逼真。在本算法试验中, m 的值取为 0.5, 该值可以保证阴影区域的像素与 m 值相乘后, 保持其亮度值介于全透明与全黑之间。

4 实现

算法实验环境为 Intel®Xeon(R) CPU E5620@双核 2.40 GHz, NVIDIA Quadro K5000。利用 GLSL 语言及 CUDA 实现。实验测试模型分别选取了通用模型 Dragon 和 Bunny; 栅栏模型, 用于观察折射效果; 复杂模型 Ball, 用于观察计算效率。图 3(a)所示为本文算法生成的水面模拟及反射综合效果, 包括半透明阴影区域。图 3(b)和 3(c)为水面反射的局部放大效果, 反射映射图的分辨率为 2 048×2 048。从实验结果可以看出, 水面波纹具有随机性, 接近自然效果且近距离水面倒影及光照反射细节表现良好。

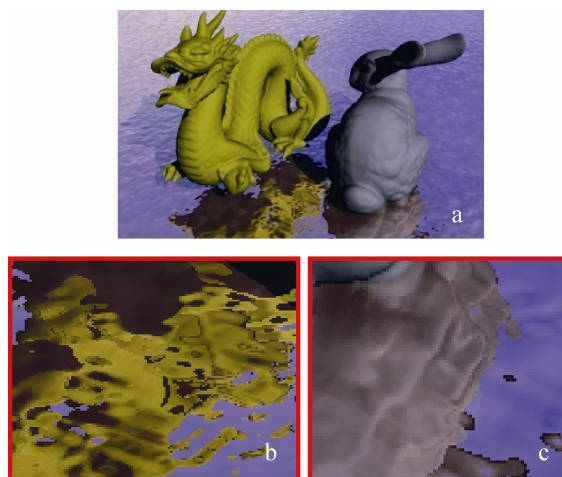
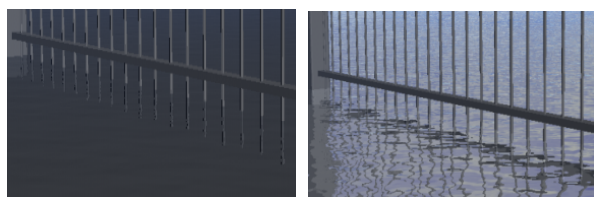
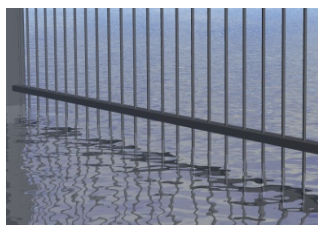


图 3 本文算法生成水面模拟综合效果

图 4 展示了绘制过程中的折射、反射效果, 其中图 4(a)为折射效果, 通过栏杆测试模型, 较好的反应了折射计算的近似物理正确性; 图 4(b)为叠加了二次反射映射图的表面反射计算; 图 4(c)为表面折射、反射的综合效果, 本文算法没有考虑光线在水下的投射和焦散现象。



(a) 折射 (b) 表面反射



(c) 表面反射+折射

图 4 折射及反射计算

图 5 测试了细小几何模型的绘制效果，分辨率为 $1\ 024 \times 2\ 048$ ，图(a)~(c)中的模型距离水面逐渐变化，蝴蝶模型的腿部细节表现较好。在绘制时间上，表 1 对比了不同模型以及不同反射映射图分辨率的绘制帧率。随着模型的复杂度和反射映射图分辨率的变化，绘制帧率从 33.4 FPS 到 65.6 FPS。从实验结果可以看出模型的复杂性对于算法影响小，反射映射图分辨率是影响计算帧率的主要因素，说明本算法具有独立于场景复杂性的特点，扩展性更灵活。

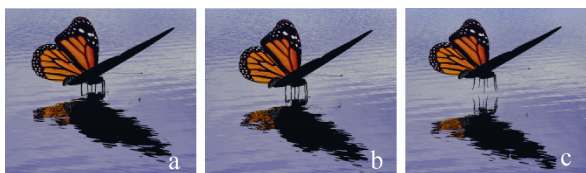


图 5 细小几何体反射映射绘制效果

表 1 不同反射映射图分辨率绘制效率对比

模型	顶点	多边形	反射映射图	帧率/FPS
Dragon and bunny	1 527 728	2 459 294	2 048×2 048	45.1
White Ball	19 872	39 936	512×512	61.7
White Ball	19 872	39 936	2 048×2 048	33.4
Butterfly	213 182	73 138	2 048×2 048	42.5
Fences	4 987	12 003	1 024×2 048	65.6

图 6 所示为不同分辨率的二级反射映射图的绘制对比，其中图 a 的分辨率为 512×512 ；图 b 的分辨率为 $2\ 048 \times 2\ 048$ 。从图中可以明显看出，a

图由于分辨率不足，反射倒影连续性不好。可见随着分辨率的增加，水面模拟效果变化明显，当然计算时间复杂度也相应增加，后面将对分辨率与模型复杂度的计算时间进行对比分析。为了测试动态水面的正确模拟，实验连续截取了相隔 10 帧的 6 幅水面效果，从中可以观察到倒影的连续变化，可以看出基于简化的 NS 方程是有效的动态水面模拟手段，如图 7 所示，反射映射图分辨率 $2\ 048 \times 2\ 048$ 。

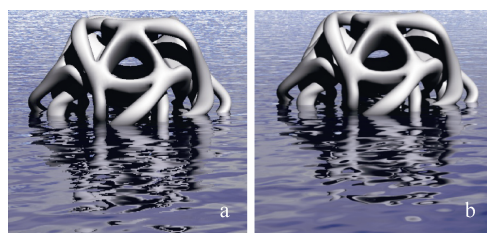


图 6 不同分辨率的二级反射映射图的绘制对比

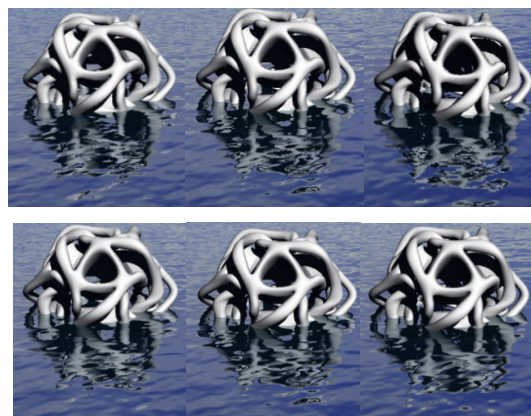


图 7 时间间隔 10 帧的动态水面模拟效果

图 8 所示为已有方法与本文的对比，其中图 a 所示为 Truelsen 等^[26]提出的基于纹理贴图的水面模拟方法，其纹理贴图分辨率为 $1\ 024 \times 1\ 024$ 。该方法较好的实现了远处景物倒影和水面光照的计算，但是水表面的反射计算不够逼真，尤其是倒影细节不够清晰。适合于交互式游戏中场景变换频繁的虚拟场景。图 b 所示为利用快速傅里叶(FFT)方法模拟的动态水面，该方法从水面运动角度，实现了水面的真实感模拟；图 c 所示为混合快速傅里叶变换与 Perlin 噪声结合的绘制效果^[27]，该方法主要侧重于方向风等对水面的作用效果，图 d 为 Ben^[23]提出的利用 DUDV 技术生产的凹凸贴图实现水面

效果。图 e 为本文的二次反射映射方法, 分辨率为 1024×1024 , 侧重实现了水面光照及近水面物体在水面的反射效果。利用帧间纹理共享的方法, 获得了较好的绘制帧率。

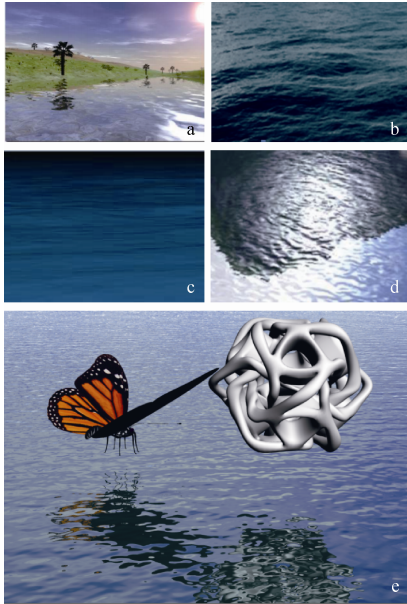


图 8 不同的水面模拟算法与本文算法对比

5 结论

论文提出了利用简化的 NS 方程及反射映射技术, 生成二次反射映射图, 利用透视投影映射到水面, 实现了水面的快速模拟。该方法在水面动态、反射及折射方面都实现了比较精确的模拟。算法仍存在不足之处: 主要体现在计算效率还有待进一步提高, 水面的反射和折射只是近似模拟。更进一步的工作将在 NS 方程的基础上, 考虑更多的水面因素, 如风向, 压力等。同时考虑更多的水面模拟方法, 进一步改进绘制效率和效果。

参考文献:

- [1] Foster N, Fedkiw R. Practical animation of liquids [C]// Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. USA: ACM, 2001: 23-30.
- [2] English R E, Qiu L, Yu Y, et al. Chimera grids for water simulation [C]// Proceedings of the 12th ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. USA: ACM, 2013: 85-94.
- [3] Viñas M, Lobeiras J, Fraguera B B, et al. A multi - GPU shallow-water simulation with transport of contaminants [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience (S1532-0634) 2013, 25(8): 1153-1169.
- [4] Hasselmann D E, Duncel M, Ewing J A. Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973 [J]. Journal of Physical Oceanography (S0022-3670), 1980, 10(8): 1264-1280.
- [5] Ross V, Dion D. Sea surface slope statistics derived from Sun glint radiance measurements and their apparent dependence on sensor elevation [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (S2169-9291), 2007, 112(C9): C09015:1-C09015:11..
- [6] Tessendorf J. Simulating ocean water [J]. Simulating Nature Realistic and Interactive Techniques, SIGGRAPH (S1569-190X), 2001, 1(2): 5.
- [7] Chiu Y F, Chang C F. GPU-based ocean rendering [C]// 2006 IEEE international Conference on Multimedia and Expo. USA: IEEE, 2006: 2125-2128.
- [8] Premoze S, Ashikhmin M. Rendering natural waters [J]. Computer Graphics Forum (S0167-7055), 2001, 20(4): 189-199.
- [9] Hinsinger D, Neyret F, Cani M P. Interactive animation of ocean waves [C]// Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation. USA: ACM, 2002: 161-166.
- [10] De Boer W H. Fast terrain rendering using geometrical mipmapping[R]. (2000-10-01) [2016-09-20]. http://www.flipcode.com/articles/article_geomipmaps.pdf, 2000.
- [11] Johanson C, Lejdfors C. Real-time water rendering [D]. Department of Computer Science, Lund University March 2004.
- [12] Yang X, Pi X, Zeng L, et al. GPU-based real-time simulation and rendering of unbounded ocean surface [C]// Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics (CAD-CG'05). USA: IEEE, 2005: 6.
- [13] Hu Y, Velho L, Tong X, et al. Realistic, real - time rendering of ocean waves [J]. Computer Animation and Virtual Worlds (S1546-4261), 2006, 17(1): 59-67.
- [14] Chentanez N, Müller M. Real-time Eulerian water simulation using a restricted tall cell grid [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2011, 30(4): 82.
- [15] Untergassmair M, Berg M. Real Time Fluid Simulation [R]. (2008-02-12) [2016-09-20]. <http://www.cse.iitd.ernet.in/~cs5080212/MiniP.pdf>
- [16] O'brien J F, Hodgins J K. Dynamic simulation of splashing fluids [C]// Computer Animation'95,

- Proceedings. USA: IEEE, 1995: 198-205, 220.
- [17] Wang Y, Baboulin M, Dongarra J, et al. A parallel solver for incompressible fluid flows [J]. *Procedia Computer Science* (S1877-0509), 2013, 18(1):18: 439-448.
- [18] Fournier A, Reeves W T. A simple model of ocean waves [J]. *ACM Siggraph Computer Graphics* (S0097-8930), 1986, 20(4): 75-84.
- [19] Peachey D R. Modeling waves and surf [J]. *ACM Siggraph Computer Graphics* (S0097-8930), 1986, 20(4): 65-74.
- [20] Schachter B. Long crested wave models [J]. *Computer Graphics and Image Processing* (S0146-664X), 1980, 12(2): 187-201.
- [21] Bruneton E, Neyret F, Holzschuch N. Real-time Realistic Ocean Lighting using Seamless Transitions from Geometry to BRDF [J]. *Computer Graphics Forum* (S0146-664X), 2010, 29(2): 487-496.
- [22] Wyman C. An approximate image-space approach for interactive refraction [J]. *ACM Transactions on Graphics* (TOG) (S1050-1053), 2005, 24(3): 1050-1053.
- [23] Humphrey B. Realistic water using bump mapping and refraction [J]. Retrieved June (S0000-0019), 2006.
- [24] Goddeke D, Buijssen S H M, Wobker H, et al. GPU acceleration of an unmodified parallel finite element Navier-Stokes solver [C]. *High Performance Computing & Simulation, 2009. HPCS'09. International Conference on. USA: IEEE, 2009: 12-21.*
- [25] Wang Y, Baboulin M, Rupp K, et al. Solving 3D incompressible Navier-Stokes equations on hybrid CPU/GPU systems [C]// *Proceedings of the High Performance Computing Symposium. USA: Society for Computer Simulation International, 2014: 12.*
- [26] Truelsen R. Real-time shallow water simulation and environment mapping and clouds [D]. (2007-04-25) [2016-09-20]. <http://image.diku.dk/projects/media/rene.truelsen.07.pdf>
- [27] Tian L. Ocean wave simulation by the mix of FFT and Perlin Noise [J]. (2014-06-05) [2016-09-20]. <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/11943/Tian.pdf?sequence=1>

(上接第 2518 页)

- [2] 任磊, 杜一, 马帅, 等. 大数据可视分析综述 [J]. *软件学报*, 2014(9): 1909-1936.
- [3] Ahlberg C, Shneiderman B. Visual Information Seeking: Tight Coupling of Dynamic Query Filters with Starfield Displays [C]// *Proceedings, Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI 1994, Boston, Massachusetts, USA, April 24-28, 1994.* 1994: 7-13.
- [4] Ward M O. XmdvTool: integrating multiple methods for visualizing multivariate data [C]// *Conference on Visualization. USA: IEEE Computer Society Press, 1994: 326-333.*
- [5] Tatu A, Albuquerque G, Eisemann M, et al. Automated Analytical Methods to Support Visual Exploration of High-Dimensional Data [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics* (S1077-2626), 2011, 17(5): 584-597.
- [6] Elmqvist N, Dragicevic P, Fekete J D. Rolling the dice: multidimensional visual exploration using scatterplot matrix navigation. [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics* (S1077-2626), 2008, 14(6): 1141-1148.
- [7] Aigner W, Miksch S, Müller W, et al. Visual methods for analyzing time-oriented data. [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics* (S1077-2626), 2008, 14(1): 47-60.
- [8] Havre S, Hetzler E, Whitney P, et al. ThemeRiver: visualizing thematic changes in large document collections [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics* (S1077-2626), 2010, 8(1): 9-20.
- [9] Carlis J V. Interactive visualization of serial periodic data [C]// *ACM Symposium on User Interface Software & Technology. USA: ACM, 2000: 29-38.*
- [10] Plaisant C, Milash B, Rose A, et al. LifeLines: visualizing personal histories [C]// *Readings in information visualization. USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999: 221-227.*
- [11] Xie C, Chen W, Huang X, et al. VAET: A Visual Analytics Approach for E-Transactions Time-Series. [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics* (S1077-2626), 2014, 20(12): 1743-1752.
- [12] Albo Y, Lanir J, Bak P, et al. Off the Radar: Comparative Evaluation of Radial Visualization Solutions for Composite Indicators. [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics* (S1077-2626), 2016, 22(1): 569-578.
- [13] Bach B, Shi C, Heulot N, et al. Time Curves: Folding Time to Visualize Patterns of Temporal Evolution in Data. [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics* (S1077-2626), 2015, 22(1): 1-10.

<http://www.china-simulation.com>