

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)08-1497-06

论文索引信息: 李晨辉, 王长波, 李洋, 赵敏, 汪国憬, 刘董倩. 真实感海底场景的实时绘制 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(8): 1497-1502

真实感海底场景的实时绘制

李晨辉, 王长波, 李洋, 赵敏, 汪国憬, 刘董倩

(华东师范大学软件学院, 上海 200062)

摘要: 海底场景的仿真对于动画游戏、海洋勘测、航海驾驶、灾害救援等有着重要的应用意义。由于涉及更加复杂的海水与光线、地形等的交互, 海底场景中的复杂刻蚀、光束、散射等效果是实时绘制海底场景的难点。基于海底环境的物理机理, 首先提出基于线框绘制模式结合高斯滤波的方法来模拟精细的刻蚀效果, 采用贴近真实的散射相位函数计算海底散射来模拟水下海水颜色, 采用柱面组织的光束算法来模拟海底光线效果, 并进一步给出一种基于空间划分的海底场景绘制优化方案, 最后基于 GPU 加速技术实现了不同情况下的真实感海底场景的实时绘制。

关键词: 海底场景; 光束; 散射; 刻蚀; 绘制

Real-time realistic rendering of under seawater scene

Li Chenhui, Wang Changbo, Li Yang, Zhao Min, Wang Guojing, Liu Dongqian

(College of Software, East China Normal University, Shanghai 200062 China)

Abstract: Rendering of under seawater scenes is of great significance for games, marine surveying, marine drive, and disaster succor. It's hard and time-consuming to real-time render the under seawater scene with caustics, shafts and scatterings because of the complex interaction between light and seawater. We propose consecutively an efficient method to render caustics based on the combining of wire-frame mode and gauss filter; a more realistic scattering phase function for under seawater to model the scattering and calculate the seawater color; a cylinder-based shaft algorithm to simulate the shaft light under seawater. Eventually, we introduced the hierarchy optimize method and GPU accelerate technology to successfully render different under seawater scenes in real time.

Keywords: under seawater scene; shaft light; scattering; caustic; rendering

0 引言

虚拟海洋环境的建模与绘制一直是计算机图形学研究的热点, 其在电脑游戏、影视特效、航海驾驶、海洋勘测、灾害救援等方面都有重要的应用价值。

海水的仿真包括海浪及水下场景, 目前国内外的研究者对于海浪及海面环境的模拟研究得较多, 而对于海底环境的仿真研究还较少。随着人类对海底资源的开发加速, 水下作业的增加, 进行水底场景仿真的研究具有重要的现实意义。

与陆地及水面场景的仿真相比, 水下场景仿真

收稿日期: 2010-07-19; 修回日期: 2010-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61070128); 上海市青年科技启明星计划项目(08QA14025); 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放基金项目(A1008); 上海海事大学重点学科开放基金项目(S30602); 中央高校基本科研业务费专项资金项目。

第一作者简介: 李晨辉(1986—), 男, 华东师范大学软件学院计算机应用专业硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学。E-mail: chenhuili@ecnu.cn。

通讯作者: 王长波, E-mail: cbwang@sei.ecnu.edu.cn。

无疑更加复杂,其难点在于:1)海底环境涉及海水与光线等交互作用,会发生更加复杂的刻蚀、光束、水下阴影等现象;2)海底场景会受到海底地形、海水深度、海水散射等的影响,不同区域呈现不同的颜色;3)海底场景不再是小区域的水域绘制,其涉及更大尺度更广范围,这就给实时绘制带来了困难。

针对以上难点,充分考虑海底环境中海水与光线的交互作用,对海底环境中的刻蚀、光束、海水散射等效果进行高效快速建模,并通过层次优化和加速技术来实现不同海底场景的实时绘制。

近年来,对于海洋环境的仿真主要集中于海浪几何模型及表面着色。目前关于海浪的绘制技术已经基本成熟,经典的海浪模型包括格斯拉、柏林噪声、FFT 等,海水着色效果则主要通过计算菲涅尔系数及太阳光照增加海面的真实感^[1]。Eric^[2]考虑双向反射分布(BRDF)对海水着色的影响,较大地提高了海水着色的效果。但是海底环境涉及更加复杂的光线与海水的交互作用,涉及海底刻蚀、水下光束、海水散射等多种现象,对于这些方面的研究工作目前还不多。

刻蚀(caustic)是常见的水下光聚集现象。Musawir^[3]提出一种基于图像空间的刻蚀图(caustic mapping)算法,其采用类似于阴影图的原理,将刻蚀投影于场景中进行二次绘制,从而避免了复杂的几何检测并且无须做预处理计算。Spencer^[4]提出松弛光子(photon)算法改进了刻蚀的仿真质量,使得刻蚀效果更为柔和。但这种光子映射的方法计算量较大,生成的刻蚀质量取决于发生光子的数量。Wyman^[5]提出分层次刻蚀图的方法提高了绘制速度,并支持多光源的实时绘制。Cem^[6]基于高度场高效模拟了水刻蚀的效果,但要求水底为平面,难以用于起伏水底场景刻蚀的绘制。Ernst^[7]使用内插法提高刻蚀计算精度,生成了较为逼真的水底刻蚀。海底刻蚀是海底最重要的特征,采用新的刻蚀图绘制模式,并使用可变的滤波模板对刻蚀图进行滤波,进行海底刻蚀效果的模拟。

光束是海底浅水区常见的光学现象。Yoshinori^[8]将光束的信息绘制到各个空间截断面上,通过叠加多个面光分量信息来合成光束效果,这种方法绘制出的光束连贯性不够。Iwasaki^[9]将海面折射光线构成的空间分割成多个锥体,并对锥体进行光强的积分计算,给出贴近真实物理模型的绘制方法,但空间体剖分和积分运算降低了算法的效

率。Papadopoulos^[10]使用绘制线的方法来模拟光束效果,由于线条光栅化的限制,需要提高光线的采样量。Hu^[11]考虑点光源对光线衰减的影响,基于刻蚀体的理论及光线绘制法较为逼真地模拟了水下光束效果,其对各相散射分量进行了求和,但仅适用于较小的水下场景。对于较大规模的海底环境,点及线的光束采样常常不能得到好的效果。

海水的散射也是海底环境的特征之一。Tomoyuki^[12]较早展开对自然场景中光散射的研究,提出了针对于各种天空场景的散射模型。Sun^[13]提出一种实用的单散射模型,可提高灯光效果下场景散射的真实度,这种模型考虑了场景散射对物体的影响,对海水散射有一定的参考价值。光在海洋中主要发生微颗粒的米氏散射,一般采用 Henyey-Greenstein 函数来近似表示海水的散射相位函数。Vladimir^[14]提出一种改进的双目 HG 函数(Two-Term Henyey-Greenstein),函数曲线图与实测得出的相位函数图基本一致。本文将使用改进的双目 HG 函数作为海水的相位函数,并考虑不同因素对海水颜色的影响,绘制出更加逼真的海水颜色。

1 基于光学的水底场景建模

1.1 水底刻蚀模型

水下刻蚀效果通常是指水表面的折射光线集聚力到水底某一点形成的不规则亮斑。要正确地绘制刻蚀,需要追踪光线传播的路径。光线在水里的折射方向由 Shell 定律决定,根据入射光线、水面法线、空气及水的折射系数可近似求得折射光线,图 1 为光折射产生刻蚀的示意图。模拟刻蚀的一个难点是求折射光线与水底的交点。如果水底为平面,可利用直线与面的几何求交公式求解交点,而对于崎岖不平的海底表面,传统的求交操作需要遍历整个海底面片,即使利用区域判断等方法缩小求交范围,计算量也非常大。这里采用一种快速的牛顿迭代法来进行求交。假设 P_1 为入射点, P_2 为交点, r 为折射光线单位向量,可得: $P_2 = P_1 + kr$ 。若 $f(k) = 0$ 为求交方程,显然 $k = 1$ 是该方程的一个近似解 k' , 进行牛顿迭代计算可获得更为近似的解。由于海底地形起伏不是非常剧烈,一般迭代 3 次左右可获得非常近似的交点^[3]。这种方法可将几何求交运算转化为数值求解运算,求解所需数据可保存于纹理中,便于 GPU 加速提高绘制效率。

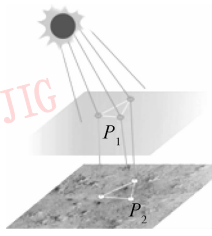
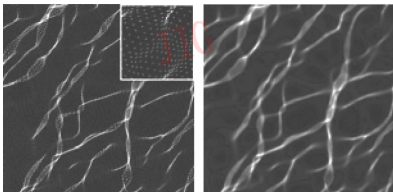


图 1 光路示意图

Fig. 1 Paths from the light

为提高刻蚀的绘制效率,可将刻蚀预先绘制成一张刻蚀图,再渲染到场景中。将计算得到的水底交点,以点的形式绘制在刻蚀图的对应位置,并用图形硬件进行混合累加,聚集光线较多的位置的亮度较高,形成了刻蚀光斑。如果使用的采样点有限,刻蚀光斑不明显,刻蚀图有较多的噪点。图形硬件对三角形的绘制有点、线框、实心面片 3 种模式,其中点模式的绘制内容较为分散,面模式填充率高,但与面之间的遮挡较为频繁,线框模式用线条将采用点相连接,能够较好地保留点与点之间的联系,且遮挡较少,在一定程度上提高了像素的填充率,使用线框模式对水底的交点数据进行绘制,绘制出的刻蚀图如图 2(a)所示,线框模式绘制方法生成的刻蚀图更细腻,光斑的连续性更好。

为了获得更细腻的图片质量,我们使用层次高斯平滑滤波方法对生成的刻蚀图像进行去噪平滑处理。这里将像素点的亮度作为权值,用于选择不同大小的高斯滤波模板。滤波模板可设为 3×3 、 5×5 、 7×7 ,当亮度值较低时,使用较大的模板,提高去噪效果;当亮度值较高时,使用较小模板,减少光斑亮度损失。最后的效果如图 2(b)所示。



(a) 使用线框模式绘制的刻蚀图 (b) 对刻蚀图使用层次高斯滤波

图 2 刻蚀图

Fig. 2 Causticmap

1.2 水下光束模型

在水下常常能观察到光束的光学现象。光线产生折射进入水体,一部分被水介质或其他悬浮物吸收,一部分发生散射,剩余部分仍沿折射的方向传

播。衰减后的光线汇集到水底形成的光斑便是刻蚀,发生散射的光分量汇集后呈现在视域前形成光束。而实时绘制光束需要计算所有折射进水里光线的衰减情况。

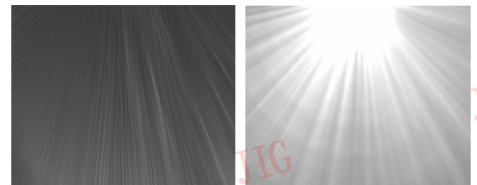
假设 $L(x)$ 为一条光线能量的变化函数, x 为该光线的某一处的位置。光线的衰减与深度呈指数关系,故可假定光线的衰减函数为 $\alpha(P_1, x)$, P_1 和 x 分别为光线的起始点和光线路径上的采样点 x 。令 $\beta(x, e)$ 为光强度从眼睛位置到光线位置的衰减函数, e 为观察点的位置。光线的亮度值还与海水的散射相位函数相关,令海水的散射相位函数为 $p(\theta, g, \alpha, h)$,海水散射相位函数将在 2.3 节详细介绍。假定 I 为光线照射到海面某点的光强。 c 为散射系数, α 为吸收系数。 $L(x)$ 的函数式定义如下:

$$L(x) = I \cdot \alpha(P_1, x) \cdot \beta(x, e) \cdot p(\theta, g, \alpha, h) \cdot c \quad (1)$$

$$\alpha(P_1, x) = \exp\left(-\int_x^{P_1} c \cdot a \cdot dx\right) \quad (2)$$

$$\beta(x, e) = \exp\left(-\int_e^x c \cdot a \cdot dx\right) \quad (3)$$

按式(1)计算光线光栅化后每个像素点的亮度值后,我们可绘制出光束,最直观的绘制方式是用线条进行绘制。



(a) 基于线绘制的光束 (b) 基于面片绘制的光束

图 3 光束绘制效果

Fig. 3 Effect of shaft light

绘制线条的方式如果线条采样数不够的话,无法很好地表现光束的效果,见图 3(a)。这里我们基于以上光衰减模型提出一种基于面片的绘制方法,使用有限的采样获得了较好的光束效果。对于每个海表面采样点,绘制的内容由直线 P_1P_2 变成光柱。由于式(1)具有各项同性,所以最好选择圆柱形光柱进行绘制,但是为了减少性能上的损失,这里选择与圆柱较为接近的正方形柱体为渲染单元,如图 4 所示。在光柱半径很小的时候,方形各向异性的贡献度很小,但是性能上可以带来较大的提高。

完全统计光柱内每个空间点的亮度情况,计算量大。可以通过积分的方式,将处于观察方向并在

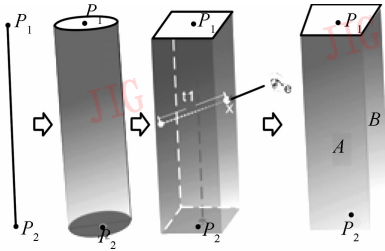


图 4 长方体光柱示意图
Fig. 4 Rectangular light column

柱体内部的点的光强做积分,将其能量强度都映射到朝向观察者的面 A 或面 B 上。由此可见柱面上每个像素点光强度为

$$L_p(x) = I_p(\theta, g) c \cdot \int_0^{t_1} \alpha(P_1, x) \beta(x, e) dt \quad (4)$$

式中 t_1 值是观察向量在柱体内部的长度。

在任意观察角度,观察者仅能看到柱体的两个面,故实际只需绘制 A、B 两面即可。与线绘制的方法相比,柱面绘制方式的光束采样率较高,生成的光束图间隙少,束状明显,在各角度观测都能获得满意的结果。光束绘制效果如图 3(b) 所示。

1.3 海水光散射模型

海里海水散射的效果是海底场景的重要组成部分。传统的海洋场景通常使用硬件固有的雾化功能粗略地模拟海底散射的效果,效果不够逼真。解决光散射的问题,需要引入散射相位函数。以往通常使用 Henyey-Greenstein 函数作为海水的散射相位函数。因海水散射的特殊性,仅使用 HG 散射相位函数与真实海水的情况仍有一定的出入,如图 5 所示,实线为 HG 函数曲线,点划线为实测海水相位曲线,

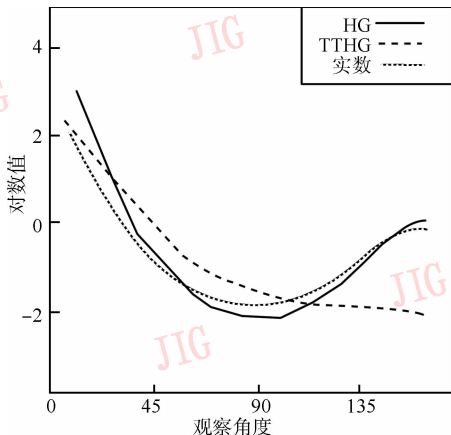


图 5 散射相位函数

Fig. 5 The diagram of scattering phase function

虚线为我们使用的双目 GE 散射相位函数 (TTGE)^[14],其曲线与实测的曲线较为接近,具体公式如下:

$$P_{GE}(\theta, g) = \frac{(1 - g^2)}{(1 - 2g\cos\theta + g^2)^{3/2}} \quad (5)$$

$$P_{TTGE}(\theta, g, \alpha, h) = \alpha P_{HG}(\theta, g) + (1 - \alpha) \times P_{HG}(\theta, -h) \quad (\alpha \geq 0, g \leq 1, h \leq 1) \quad (6)$$

其中 θ 为光线与摄像机方向的夹角(散射角), g 是前向相位函数非对称因子,是调节海水中不同的气溶胶特性的参数, α 为前向相位函数的权重, $(1 - \alpha)$ 为后向相位函数的权重, h 为后向相位函数的非对称因子。

使用以上散射相位函数对视域的近截平面的所有像素进行计算。视域近截平面像素点的几何位置 P 可通过屏幕坐标、逆投影矩阵、逆观察矩阵求出。根据该 P 值、摄像机位置及光线向量可算出散射角 θ ,代入相位函数即可求出该点的散射亮度。以上方法计算出了离摄像机最近切面的散射情况,得出的散射图与真实的海底散射较为接近,如图 6 所示。

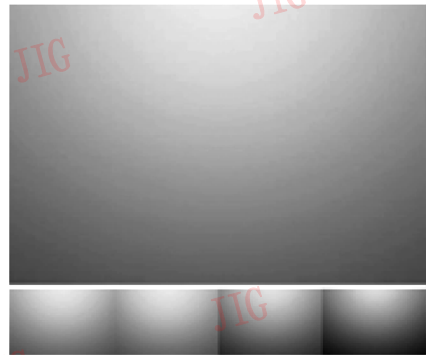


图 6 海水散射效果

Fig. 6 The effect of scattering in seawater

2 基于层次划分的海底场景绘制

2.1 基于嵌套网格的海底场景划分

使用一种较为灵活的网格形式来构建海底地形。这种方法将海底地形划分为中心区域及周边区域部分。中心区域的场景绘制较为精细。周围使用顶点采样率相同分布相似的框状网格。不同框状网格如图 7 分布,图 7 使用了 3 层外框网格及 1 层中心网格构建场景。所有网格与摄像机的相对位置保持不变,随摄像机的移动而移动。框状网格间的裂缝可使用地形 LOD 技术的折裙技术解决。在接缝处多绘制一

些高度反向的三角形网格,以填补接缝。这种灵活的网格组织方式,减少几何顶点位置的频繁变动,在提高绘制质量的同时,极大提高了 GPU 的吞吐量。

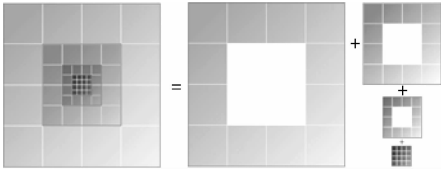


图 7 层次网格

Fig. 7 Hierarchical grids

刻蚀及光束的计算是快速绘制的瓶颈,可进一步基于嵌套网格的思想,进行层次化调度,减少刻蚀及光束的计算量。这种方法将刻蚀图分 4 层进行绘制,每层的采样数相同,但采样的间距成倍增长。中间的采样间距最小,所以相对采样精度较高。中心点为观察者位置,高采样精度为观察者提供良好的视觉效果。最后的渲染阶段,将 4 个层级的绘制结果进行叠加,中间区域设置较高权重。所有层次的刻蚀图叠加在一起,在一定程度上,减少中心区域刻蚀图走样的现象,提高了刻蚀绘制效果。

2.2 海底场景的绘制

运用以上的方法,我们可对海底场景进行绘制,

具体绘制步骤如下:

- 1) 使用牛顿迭代的方法求解采样区域内所有折射光线的交点,利用这些交点信息调用线框模式绘制出刻蚀图,刻蚀图进行高斯平滑滤波;
- 2) 绘制海底地形、海洋生物及海洋沉积物;使用嵌套网格来构建地形;
- 3) 构建海表面海浪的模型^[1],考虑了风对海浪的影响,利用 FFT 进行海浪高度的求解;使用菲涅尔公式绘制海面反射和折射效果;
- 4) 使用散射相位函数计算场景散射图;使用折射光线的交点信息及海面位置及法线信息计算光束图;
- 5) 将海底基本场景、海面、刻蚀图、光束图、场景散射图进行叠加,便得到最后的真实感海底场景。

3 绘制结果及讨论

运用以上方法,我们在 Intel (R) Pentium (R) 3.4 GHz CPU,3 GB 内存, NVIDIA GeForce GTX260 图形卡, 896 MB 显存微机上实现真实感海底场景仿真,绘制速度大于 30 帧/s,达到了实时交互需求如表 1 所示。

表 1 绘制效果效率的对比
Tab. 1 Comparison of efficiency

绘制方法	采样	光束	散射	海底环境	绘制效果	绘制速率
Iwasaki ^[9]	256 × 256	束状较明显	无	简单	中	慢
Papadopoulos ^[10]	256 × 256	束状效果差	无	较复杂	差	较快
Hu ^[11]	256 × 256	束状明显	有	中等	好	中
本文方法	256 × 256	束状明显	有	较复杂	好	快

本文方法构建了较为复杂的海底场景,海底光束的效果优于 Iwasaki^[9] 及 Papadopoulos^[10],绘制出的海水散射效果更加细腻,绘制的效率较以往的绘制方法有一定的提升。图 8 为 Iwasaki^[9], Papadopoulos^[10], Hu^[11]的绘制效果;图 9 是本文算法的绘制结果,逼真表现了海底的刻蚀、光束、散射等在内的海底场景。

基于牛顿迭代法求解交点,迭代有限的次数便可得到较为精确的解,将计算刻蚀的时间复杂度从 $O(n^2)$ 降到了 $O(n)$;提出的基于面的光束绘制方法简化了光学公式求解的过程,将计算时间复杂度从

$O(n^3)$ 降到 $O(n^2)$,计算量较 Hu^[11] 的方法有所减小。

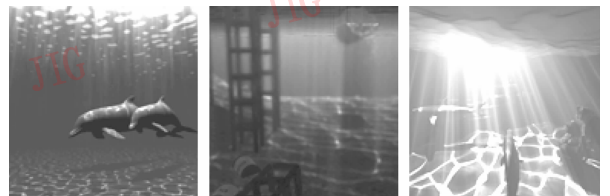


图 8 Iwasaki^[9], Papadopoulos^[10], Hu^[11] 的绘制效果

Fig. 8 The rendering effect of Iwasaki2002, Papadopoulos2009 and Hu2010

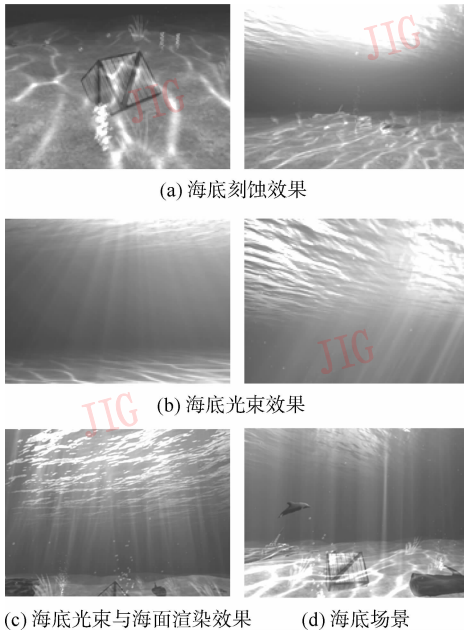


图9 海底绘制效果

Fig. 9 Rendering under seawater scene

4 结 论

针对海底环境的光学及物理机理,采用牛顿迭代求解折射光线与水底的交点,提出线框模式来绘制较为精细刻蚀效果;采用适于水下光束的海水相位函数,利用面片叠加的方式绘制出水下光束;同时考虑海水悬浮物、海水地域及深度对海水散射的影响,绘制出逼真的海水。最后,利用基于层次划分的思想和GPU加速技术来实时绘制不同情况的海底场景。

下一步应完善刻蚀图的生成方式,提升刻蚀图的质量;完善光束模型,提升光束的绘制精度;考虑多光源对海底散射的影响;加入海底生物与海底场景的交互等。

参考文献 (References)

[1] Tessendorf J. Simulating Ocean Water [R]. New York, NY, USA: ACM, 2004.

- [2] Eric B, Fabrice N, Nicolas H. Real-time realistic ocean lighting using seamless transitions from geometry to BRDF [J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(2): 487-496
- [3] Musawir S, Jaakko K, Sumanta P. Caustics mapping: an image-space technique for real-time caustics [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(2): 272-280.
- [4] Spencer B, Jones M W. Into the blue: better caustics through photon relaxation [J]. Eurographics, 2009, 28(2): 319-328.
- [5] Wyman C. Hierarchical caustic maps [C] // Proceedings of the 2008 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. Redwood City, California: ACM, 2008: 163-171.
- [6] Cem Y, John K. Fast real-time caustics from height fields [J]. Vis Comput, 2009, 25: 559-564.
- [7] Ernst M, Akenine M T, Jensen H. Interactive rendering of caustics using interpolated warped volumes [C] // Proceedings of Graphics Interface. Victoria, British Columbia: Canadian Human-Computer Communications Society, 2005: 87-96.
- [8] Yoshinori D, Tsuyoshi Y, Tomoyuki N. Interactive rendering method for displaying shafts of light [C] // Proceedings of the 8th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Hong Kong, China: IEEE Computer Society, 2000: 31-38.
- [9] Iwasaki K, Dobashi Y, Tomoyuki N. An efficient method for rendering underwater optical effects using graphics hardware [J]. Computer Graphics Forum, 2002, 21(4): 701-711.
- [10] Papadopoulos C, Papaioannou G. Realistic real-time underwater caustics and godrays [C] // Proceedings of GraphiCon 2009. Russia, Moscow: IEEE Computer Society, 2009: 89-95.
- [11] Hu W, Dong Z, Ihrke I, et al. Interactive volume caustics in single-scattering media [C] // Proceedings of the 2010 ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. New York, NY, USA: ACM, 2010: 109-117.
- [12] Tomoyuki N. Light scattering models for the realistic rendering of natural scenes [C] // Eurographics Rendering Workshop. Vienna, Austria: Springer, 1998: 1-10.
- [13] Sun B, Ravi R, Srinivasa G, et al. A practical analytic single scattering model for real time rendering [J]. ACM Transactions on Graph, 2005, 24(3): 1040-1049.
- [14] Vladimir I H. One-parameter two-term henye- greenstein phase function for light scattering in seawater [J]. Applied Optics, 2002, 41(6): 1022-1028.