

# 水下战视景仿真系统建模及实时场景渲染方法

曾艳阳<sup>1,2</sup>, 康凤举<sup>1,2</sup>, 许 鹏<sup>3</sup>, 李小军<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072;

2. 水下信息处理与控制国家重点实验室, 陕西 西安 710072;

3. 船舶系统工程部, 北京 100094)

**摘要:** 针对水下对抗建模中随机误差加入的合理性及复杂环境实时细致再现的问题, 提出了一种基于高层体系结构(high level architecture, HLA)和军用仿真平台 Flames 构建一个可定制、可重用的水下对抗视景系统的设计方法, 引入基于分形布朗运动(fractional Brownian motion, fBm)特征约束的随机误差来构建仿真模型, 同时开发出基于开放场景图(open scene graph, OSG)视景引擎的海面和水下空间, 充分利用图形处理单元(graphic processing unit, GPU)实现海面和海底地形等的快速纹理映射及渲染。该系统能适应潜-舰、直升机-潜等多种水下对抗样式的视景仿真需求。实际应用结果表明, 该系统具有较好的实时性和视觉效果。

**关键词:** 水下战; 高层体系结构; 开放场景图; 图形处理单元; 分形布朗运动

**中图分类号:** U 675.65

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.02.35

## Modeling and real-time scene rendering of underwater warfare visual simulation system

ZENG Yan-yang<sup>1,2</sup>, KANG Feng-ju<sup>1,2</sup>, XU Peng<sup>3</sup>, LI Xiao-jun<sup>3</sup>

(1. School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. National Key Laboratory of Underwater Information Process and Control, Xi'an 710072, China;

3. Shipping Systems Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

**Abstract:** According to the problems of random error's rationality in the modeling and the real-time visualization of a complex environment, a novel approach based on high level architecture (HLA) and the military simulation platform "Flames" is presented for underwater counterwork visual systems, which is customizable and reusable. The random error of feature constraint is introduced to build a simulation model based on fractional Brownian motion (fBm). Besides, the ocean surface and underwater space are developed based on the engine of the open scene graph (OSG), which makes full use of the graphic processing unit (GPU) for achieving texture mapping and rendering rapidly of ocean surface, seabed terrain and so on. The system meets the demands of various underwater confrontations (e. g. submarine vs. naval ship, the helicopter vs. submarine, etc). The practical application results show that the system has good real-time properties and visual effects.

**Keywords:** undersea warfare; high level architecture (HLA); open scene graph (OSG); graphic processing unit (GPU); fractional Brownian motion (fBm)

## 0 引言

水下战一般包括反潜战、潜舰战、水雷战与反水雷战、水下信息监视与情报侦察、水声对抗、水下信息传输与指挥控制等。目前关于水下战及其环境的仿真国内外学者已进行了一些研究<sup>[1-7]</sup>。文献[1]设计并实现了一种仿真体系结构, 能够支持现有的海军水雷战的模拟。文献[3]提出了集

指挥、控制、通信、计算机、情报、监视与侦查为一体的全新水下作战系统。文献[7]对鱼雷武器系统仿真环境做了具体的分析, 并提出了仿真架构。文献[2, 4-5]主要是对声纳探测平台、海洋环境及水下战性能评估进行研究。上述这些研究主要集中于水下战系统框架和部分作战环境要素进行分析和仿真上, 水下作战的表达形式单一。本文兼顾水下作战过程中建模和可视化两个方面, 结合军用仿真平

台 Flames 和高层体系结构 (high level architecture, HLA) 提出了新的设计方法。

一般的,在水下战模型建立过程中位置、速度、姿态等因素很少或者没有加入随机误差,这样不能保证仿真的相对真实性,并且应避免和时间的关联。而分形布朗运动(fractional Brownian motion, fBm)的增量是独立的,与运动的时间  $t$  无关。本文引入 fBm 来描述模型中位置、速度、姿态相关信息的随机性具有很好的理论支撑。另外,随着图形处理单元 (graphic processing unit, GPU) 的科学可视化技术、开源的视景开发引擎、分布式平台等技术的不断发展,水下战的对抗仿真过程对仿真环境及对抗过程的视景展示等要求越来越高。目前水下战的仿真多数使用商业引擎 Vega Prime、GVS 等,这样的视景系统开发简单、快捷。由于这些引擎不开源,导致其受限与其他功能的集成,同时也限制了其他新技术的应用(如 GPU 技术);也有直接使用 OpenGL、DirectX 等底层图形库来实现,但是引擎需要自己开发,这样就会增加开发的周期和复杂度,开发效率和稳定性势必会受到一定影响。开源引擎 OSG<sup>[8]</sup> 兼顾以上两种方法的优点:集成算法并可自由扩展。在建模过程中,利用 GPU 硬件特性对海面等视觉效果进行模拟,有效保证了场景的绘制速度。

本文所要实现的水下战视景仿真系统主要解决系统体系结构设计、特征约束随机误差的模型设计、海面及水下空间模块视景的开发、水下作战态势显示等关键技术,并从水下对抗的一个典型应用,即潜艇武器系统(红方)对直升机武器系统(蓝方)的水下对抗入手,就应用开发过程进行探讨。

## 1 系统体系结构

基于 HLA 和 Flames 水下仿真的设计方法如图 1 所示。采用了 pRTI 作为运行支撑环境,各联邦成员之间通过局域网互联。成员之间的信息交互通过 RTI 的接口成员函数来实现。想定生成与联邦管理 (scenario generation & federation management, SG&FM) 成员负责整个水下对抗仿真过程的总导演和整个联邦执行过程。Flames 作为仿真框架,用于仿真和模拟通用的开发环境,提供快速的想定和模型开发的可重用性的想定模型和程序模块,并且提供了开发同一项目时与其他设计框架共享和协作的接口规范和标准。Flames 支持在标准应用的基础上添加模型,定制自己的仿真应用,这样开发过程就可以不必关系图形显示、数据分析、数据库管理等底层问题,集中精力于仿真建模工作上。

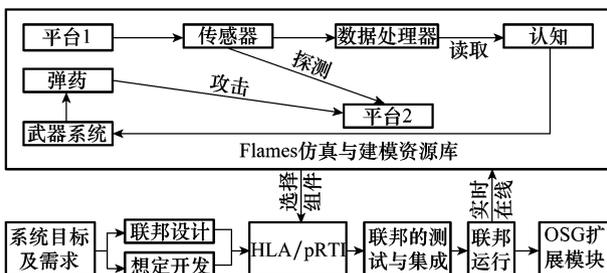


图 1 水下战视景系统设计方法

鉴于 Flames 的特性,本文研究的水下战视景仿真系统把 Flames 和 pRTI 有机的结合,即 pRTI 作为运行的支撑环境,Flames 提供仿真和建模的资源。Flames 把一个想定过程划分为平台、传感器、数据处理器、认知、武器平台和弹药等模型的相互作用过程。OSG 扩展模块可以接受 pRTI 发送的底层数据进行实时三维绘制。

需要指出的是,图 1 只是该设计方法中一种表现形式,设计过程往往不是一个严格的顺序过程,可能在没有其中一些特定成员情况下进行的,这样就会针对某个成员的特殊性去改变结构。实际的建模过程是在水下战对抗过程成员之间不断的迭代和反复进行的,且在每一层次的交互过程中都可能会伴随着并发活动,这样的结构正是建立在上述需求之上来设计的。通过该方法设计的水下战视景仿真系统具有良好的可扩展性和可组合性,使开发人员能够快速高效地构建系统所需各个成员,提高视景仿真系统的开发效率。

## 2 基于特征约束的随机误差建模

### 2.1 fBm 的引入

fBm 理论是由曼德尔布罗特等人提出的描述自然界中随机分形的一种数学模型<sup>[9]</sup>。在鱼雷、声纳、直升机、舰船、潜艇等的一次建模中,随机变量决定 Flames 各个模型的形态特征和多样性,以往的随机变量难以保证水下战模型的局部稳态,特别在声纳探测和鱼雷攻击过程中位置等信息的随机性方面。因此,设计一个好的随机变量至关重要。

假设  $X \in E^n$ ,  $B(X)$  是关于点  $X$  的实值随机函数,若存在常数  $H(0 < H < 1)$ ,使得函数是一个与  $X$  及  $\Delta X$  无关的分布函数, $B(X)$  就称为分形布朗函数。其中,  $H$  为 Hurst 指数,  $H \in (0, 1)$ 。

对于水下战动力学仿真模型来说,  $X \in (x, y, z) \in E^3$ , 代表该模型状态、位置、速度在仿真过程中的状态。模型的姿态有横滚角、偏航角和俯仰角;位置和速度都具有  $X, Y, Z$  方向的分量。

### 2.2 特征约束的随机误差

本文选取随机化函数  $\omega(t)$ , 来选取特征的随机变量。定义  $\omega(t)$  为

$$\omega(t) = c_1 b - H \sin(bt + d_1) + c_2 b^{-2H} \sin(b^2 t + d_2) + c_3 b^{-3H} \sin(b^3 t + d_3) + \dots \quad (1)$$

式中,  $c_i$  服从是一个服从正态分布的 Gauss 随机函数;  $d_i$  在区间  $[0, 2\pi]$  上服从均匀分布;  $H, b$  是分形特征参数。为了保证随机误差的合理性即消除随机变量的大幅度波动,这里引入调节  $H$  值,控制随机误差的粗糙程度。

## 3 面向 GPU 的场景生成

### 3.1 海面场景的生成

海浪具有不规则和不重复性,但其统计特性是稳定的,利用海浪谱描述海浪更为合理。现有较常用的海浪谱有 Neumann 谱、Pierson Moscowitz (PM) 谱、Bret Schneider 谱等。经典的 PM 谱公式<sup>[10]</sup>为

$$S_{PM}(\omega) = \frac{8.1 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} \exp[-0.74(\frac{g}{u\omega})^4] \quad (2)$$

式中,  $g$  为重力加速度;  $u$  为风速;  $\omega$  为风向。

PM 谱是通过采用特殊的谱分析法分析长期观测得到的海浪要素如波高、周期等得到的, 描述的是作为随机过程的海浪的能量相对于其组成波的频率分布。利用 PM 谱生成海面的过程分为两步<sup>[11-12]</sup>。

(1) 海面高层图的生成。初始化 PM 谱参数, 包括风速、风向等, 由  $S_{PM}(\omega)$  通过计算得到傅里叶网格数据并生成二维纹理传入 GPU 中处理, 在 GPU 中使用快速傅里叶变换计算得到高度场数据。

(2) 由计算得到法线图数据, 把数据结果渲染到纹理中。傅里叶网格一般越大视觉效果越好, 兼顾实时性与真实感, 这里选择  $512 \times 512$ 。

光照是提高海面视觉效果的重要因素, 可以利用 GPU 实现海面光照及纹理贴图效果<sup>[13-15]</sup>。该部分主要由 3 部分组成, 可近似的表示为

$$W_l = W_{base} + \sigma W_{rfl} + (1 - \sigma) W_{rfr} \quad (3)$$

式中,  $W_{base}$  为海面基色;  $W_{rfl}$  是水面的反射效果;  $W_{rfr}$  是水面的折射效果;  $\sigma$  为非涅尔系数, 表示光在水面发生折射和反射现象的概率, 决定二者对海面的作用比重,  $\sigma \in [0.1, 1.0]$ 。海面是连续变化的, 如果将非涅尔系数  $\sigma$  的求解过程在预处理阶段完成, 可以节省运算量。

通过顶点 shader 获得海面顶点信息并传入 GPU, 通过计算把这些信息保存在纹理中, 做成非涅尔系数纹理图, 对海面顶点进行视觉融合; 同样方法通过纹理映射, 可以得到海面基色纹理、发射纹理和折射纹理。这里设置  $u = 5 \text{ m/s}$ , 风向量为  $(1.0, 1.0)$ , 网格大小为  $512 \times 512$ , 利用可见性判断技术, 对海面进行环境光照、纹理贴图等渲染, 如图 2 所示。



图 2 海面场景渲染效果

### 3.2 “水下空间”场景的生成

根据水下战视景系统中对水下空间模块的视景仿真要求, 需要提供浑浊效果、环境颜色、闪烁光斑、海底地形等视觉内容的模块。为此设计了一种水下空间视景开发模块, 并嵌入到 OSG 引擎中。

浑浊效果主要是采用 OSG 的粒子系统。这里要兼顾能见度和实时性, 在海洋生成时初始化一定数量的粒子, 一个以视点为圆心的球形区域发射粒子, 做随机速度和方向的缓慢运动, 超出视线则重新绘制。

海底环境颜色可以直接打开 OSG 的雾效, 并设置为淡蓝色。海底的闪烁光斑效果是基于动态循环纹理贴图而实现的, 光斑大小、闪烁频率可由仿真应用动态调整。

对海底地形的视景仿真中, 采用加权外推并采用双三次样条插值细分的建模算法<sup>[16]</sup>, 地形模型表示为

$$z_{xy} = \frac{\sum_{i=x-1}^{x+2} \sum_{j=y-1}^{y+2} \frac{z(i,j)}{r(i,j)} + \sum_{i=x}^{x+1} \sum_{j=y}^{y+1} A(i,j)}{\sum_{i=x-1}^{x+2} \sum_{j=y-1}^{y+2} \frac{1}{r(i,j)} + \sum_{i=x}^{x+1} \sum_{j=y}^{y+1} A'(i,j)} \quad (4)$$

式中,  $z_{xy}$  为控制点网格  $x$  行  $y$  列围成区域内的随机点的高度;  $x, y$  分别为控制点网格的行列序号,  $x = 1, 2, \dots, n, y = 1, 2, \dots, m, n$  为总行数,  $m$  为总列数。

$$A(i,j) = \frac{z_{v(i,j)(i,j-1)}}{r(i,j) + d_{(i,j)(i,j-1)}} + \frac{z_{v(i-1,j)(i,j-1)}}{r(i,j) + d_{(i,j)(i-1,j-1)}} + \frac{z_{v(i,j)(i-1,j)}}{r(i,j) + d_{(i,j)(i-1,j)}} \\ A'(i,j) = \frac{1}{r(i,j) + d_{(i,j)(i,j-1)}} + \frac{1}{r(i,j) + d_{(i,j)(i-1,j-1)}} \quad (5)$$

式中,  $z_{v(i,j)(i,j-1)}$  表示控制点  $Q_{i,j}$  和  $Q_{i,j-1}$  的高程线性外推值;  $d_{(i,j)(i,j-1)}$  表示点  $Q_{xy}$  到直线  $Q_{i,j}Q_{i,j-1}$  的距离;  $r_{(i,j)}$  表示点  $Q_{xy}$  与控制点  $Q_{i,j}$  之间的距离。

海底地形的 GPU 渲染与海面类同。这里选择粒子数量为 2 000 个, 光斑闪烁频率为 2 Hz, 海底地形网格大小为  $512 \times 512$ , 对光斑闪烁纹理及海底地形纹理贴图进行渲染, 形成的水下空间效果如图 3 所示。

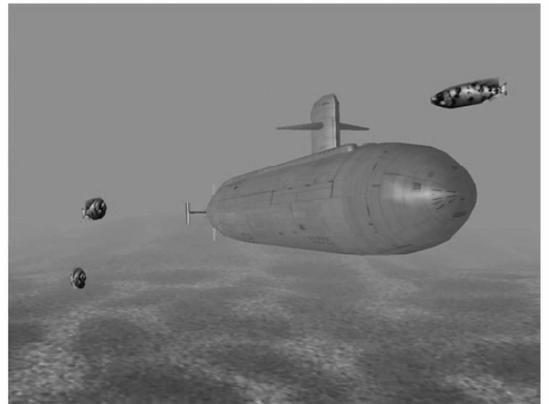


图 3 水下空间渲染效果

## 4 典型应用

以一艘直升机和一艘潜艇为水下战视景系统的典型应用实例, 通过对该特定仿真应用研究, 可以为如何构建其他不同的水下对抗仿真提供经验, 为其他式样水下战的扩展打下基础。

### 4.1 典型的水下战假定

假定参与作战仿真实体如下。

(1) 红方

作战平台: 潜艇; 装载武器: 鱼雷; 装载传感器: 声纳。

## (2) 蓝方

作战平台：反潜直升机；装载武器：空投鱼雷；装载传感器：吊放声纳。

初始态势想定为：以红方潜艇与蓝方直升机在某一海域作战为背景，仿真开始时，潜艇在某一海域低速巡逻；反潜直升机在潜艇必经阵地进行巡逻、搜索，协同反潜，通过友军的舰载声纳对潜艇进行探测，舰载直升机配置在潜艇来袭的方位，并使用吊放声纳进行搜索，准备对潜艇进行攻击。

在此过程中，根据 HLA 和 Flames 框架的工作机制，把所有联邦成员加入到 HLA 中，通过联邦成员按想定执行，实时在线把数据发送给 Flames 仿真体系。Flames 对仿真过程二维态势显示，视景系统则对其进行实时的三维模拟。

### 4.2 态势显示与分析

通过对上述想定的模拟，Flames 仿真中的态势如图 4 所示，可以看出水下战中攻防对抗的态势。

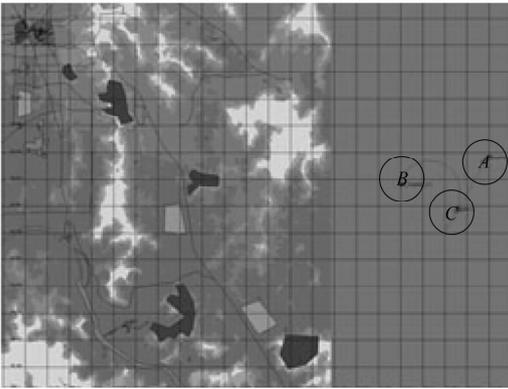
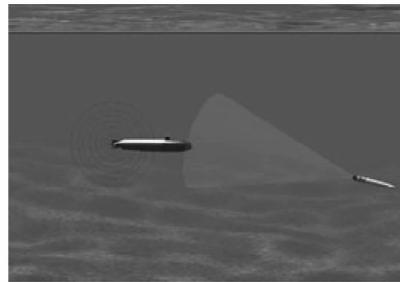


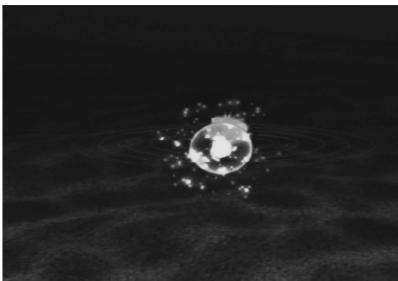
图 4 Flames 仿真态势



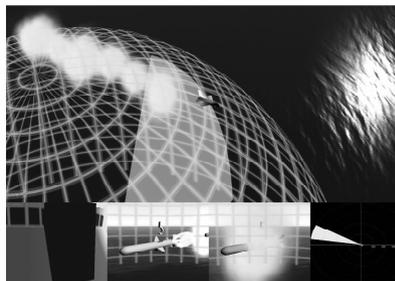
(a) 鱼雷自导



(b) 鱼雷搜索目标



(c) 命中目标



(d) 多窗口显示

图 5 水下战视景系统显示效果

作战双方依照各自作战的目的，在不同阶段使用不同的方式攻击或防御对方。图 4 中，A 为红方潜艇，B 为蓝方声自导鱼雷，C 为蓝方反潜直升机。C 到达投雷点，进行空投鱼雷，B 入水后进行环搜，追踪红方潜艇 A，而 A 则根据声纳探测到 B，进行规避操作。

确定该随机误差的分布情况。根据蒙特卡罗统计方法对加入的随机误差进行 1 000 次数理统计，结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出，随着特征指数  $H$  的减小，相同的环境下鱼雷的命中次数越来越少。

表 1 不同特征随机误差的蒙特卡罗统计

fBm	1 000 次数理统计( $b=1.2$ )		
	$H=0.75$	$H=0.50$	$H=0.25$
命中次数	934	869	791

### 4.3 视景显示与分析

该系统的硬件平台配置为：处理器为 Intel(R)Core(TM) i7CPU/870@2.93 GHz，内存为 DRR11800/4 GB，显卡为 NVIDIA GeForce GTX 260/1 024 MB，硬盘为 500 GB/7 200 16 M；软件配置为：Window 7，OpenGL 2.0，OSG2.8.2，Visual Studio 2005，CG 语言。

根据想定文件，视景系统接收仿真初始化信息，完成各实体模型的配置，按仿真流程进行实时可视化。图 5 为水下站视景显示效果图。图 5(a) 为鱼雷落水后自导航过程，为增加击中目标概率选择发射 3 条鱼雷进行组合攻击；图 5(b) 为鱼雷通过声纳系统探测到敌方潜艇位置；图 5(c) 为鱼雷击中目标潜艇后爆炸的瞬间；图 5(d) 为整个水下战视景系统的多窗口显示效果图。

本文开发的水下战视景系统已成功应用到某虚拟的水下战项目中，取得了较好的效果。视景画面生动逼真，显示

速度整体达到 45 帧/s。经测试，根据加入实体的数量，帧速可能会上下浮动，不过这完全可以满足实时交互的要求。

## 5 结 论

本文完成了水下战视景系统的设计,该系统有以下优点。

(1) 对仿真模型中随机误差的加入方面,引入 fBm,使仿真更贴近实际。

(2) 面向 GPU 实现基于 OSG 的海面及水下空间模块,充分利用了 GPU 的加速特性提高视景仿真的效率,可同时满足实时交互和逼真度的需求。在 GPU 中将一些复杂计算的结果存储成纹理图,减少计算机的计算量。

(3) 开发了一套可定制、可扩展的水下对抗视景仿真系统,并可根据水下对抗的结果进行合理性评估,是研究水下作战的有力仿真工具。

## 参考文献:

- [1] Floore T E, Gilman G H. Design and capabilities of an enhanced naval mine warfare simulation framework[C]// *Proc. of the Winter Simulation Conference*, 2011: 2607 - 2613.
- [2] Seo K M, Song H S, Kwon S J. Measurement of effectiveness for an anti-torpedo combat system using a discrete event systems specification-based underwater warfare simulator[J]. *Journal of Defense Modeling and Simulation*, 2011, 8(3): 157 - 171.
- [3] Castaneda P, Wei C C, Chiam D. Advanced undersea warfare systems[C]// *Proc. of the AUUSI Unmanned Systems North America Conference*, 2011: 691 - 693.
- [4] Tucker J D, Azimi-Sadjadi M R. Coherence-based underwater target detection from multiple disparate sonar platforms[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, 36(1): 38 - 52.
- [5] Yao L H, Kang F J, Han H. Research of the design of a scene simulation general framework[C]// *Proc. of the International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems*, 2012: 973 - 982.
- [6] Bruneton E, Neyret F, Holzschuch N. Real-time realistic ocean lighting using seamless transitions from geometry to BRDF[J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(2): 489 - 496.
- [7] 康凤举, 顾浩, 吴宇, 等. 基于 HLA 的鱼雷武器系统仿真环境设计与实现[J]. *兵工学报*, 2007, 28(3): 382 - 384. (Kang F J, Gu H, Wu Y, et al. Design and implementation of simulation environment for HLA-compliant torpedo weapon system[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(3): 382 - 384.)
- [8] 肖鹏, 刘更代, 徐明亮. Open Scene Graph 三维渲染引擎编程指

南[M]. 北京:清华大学出版社, 2010: 171 - 176. (Xiao P, Liu G D, Xu M L. *Three dimensional rendering engines programming guide for Open Scene Graph*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 171 - 176.)

- [9] 朱桦, 姬翠翠. 分形理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 197 - 199. (Zhu H, Ji C C. *Fractal theory and its applications*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 197 - 199.)
- [10] Jiang W, Ji C C, Zhu H. Fractal study on plant classification and identification[C]// *Proc. of the International Workshop on Chaos-Fractals Theories and Applications*, 2009: 434 - 438.
- [11] Pierson W J, Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on similarity theory of S. A. Kilaigorodskii[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(24): 5181 - 5190.
- [12] Pi Y J, Wang X Y, Luo X Y, et al. Simulation to random ocean wave spectrum using six degrees of freedom ship motion simulator[J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2010, 30(4): 375 - 378.
- [13] Johanson C. Real-time water rendering[D]. Lund: Lund University, 2004: 14 - 25.
- [14] Han J W, Wang Q, Zhou K, et al. Wang Tiles based geometric texture synthesis[J]. *Journal of Software*, 2009, 20(12): 3254 - 3264.
- [15] Lu J, Wang D. An ocean wave simulation research based on controllable FBM model[C]// *Proc. of the 6th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2010.
- [16] Song Z M, Kang F J. Seabed scene simulation in Vega extending module[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2003, 2(2): 40 - 45.

## 作者简介:

曾艳阳(1987 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为计算机图形学、三维视景。

E-mail: zyyhost@126.com

康凤举(1947 -), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为系统仿真理论及应用、自动控制理论。

E-mail: kangfengju@nwpu.edu.cn

许鹏(1984 -), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为计算机仿真。

E-mail: 150232865@qq.com

李小军(1979 -), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为计算机仿真。

E-mail: ghostincell@gmail.com