

# Research of Ocean Battlefield Simulation System Based on GPU

Gang Shao<sup>1</sup>, Hua Jiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>60th Research Institute of General Staff Department, Chinese People's Liberation Army, Nanjing

<sup>2</sup>Laboratory of Three Dimensional Simulation, 60th Research Institute of General Staff Department, Chinese People's Liberation Army, Nanjing  
Email: Jianghua60@hotmail.com

Received: Jul. 27<sup>th</sup>, 2012; revised: Aug. 18<sup>th</sup>, 2012; accepted: Sep. 1<sup>st</sup>, 2012

**Abstract:** The Simulation of naval battlefield environment is very important in fighting simulation system. The vivid and real-time simulation of ocean battlefield environment is the base of fighting simulation system, which offers a very nice simulation platform for fighting evaluating. This paper that used GPU program technique, researches how to develop more realistic simulation system of ocean battlefield.

**Keywords:** Ocean Battlefield; Simulation; GPU

## 基于 GPU 的海战场环境研究

邵刚<sup>1</sup>, 姜华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军总参谋部第六十研究所, 南京

<sup>2</sup>中国人民解放军总参谋部第六十研究所, 三维仿真实验室, 南京

Email: Jianghua60@hotmail.com

收稿日期: 2012年7月27日; 修回日期: 2012年8月18日; 录用日期: 2012年9月1日

**摘要:** 海战场环境仿真是海军作战模拟的重要内容, 逼真的战场环境实时仿真是作战模拟的基础, 它为保障、分析、作战评估等试验提供了仿真平台。本文采用 GPU 的编程技术, 研制开发高度逼真的海洋战场视景仿真系统。

**关键词:** 海战场; 仿真; GPU

### 1. 引言

现代海上战争规模越来越大, 综合性越来越强, 科技水平越来越高, 耗费资金越来越多, 为了节省训练开支, 迫切需要采用先进的仿真技术进行模拟训练<sup>[1]</sup>; 为确保战争目标的实现, 并尽可能降低代价, 就需要对各种可能出现的复杂情况和各种可能实施的战略、战役、战术进行反复、科学、客观的论证评估; 另外, 大规模军事演练往往带有国际政治敏感性, 并且受到有关国际条约的约束。这一切都对军事仿真演练, 特别是军事仿真演练技术、手段、方式的突破和有关信息基础设施的大规模建设提出了越来越迫切

的需求。作战模拟是计算机技术、军事运筹学理论和战役战术学相结合的产物, 是对实际作战环境、军事行动和作战过程的描述和模仿, 是对作战活动的一种相似性复现。作战模拟技术已经被世界各军事强国广泛应用。

目前国内外有很多学者进行了海浪模拟研究。对海浪的研究一般有三个方法: 一是从流体力学的角度研究海浪的波动, 通过一些列简化和近似, 用数值方法求解流场, 这类方法效果逼真, 但计算效率低, 难以满足实时性的要求<sup>[2]</sup>。二是从几何模型角度出发, 采用三角函数和参数方程构造海浪曲面, 这类方法简

单、速度快，可以近似模拟海浪，但对于波峰较高的波浪模拟效果不真实。三是从海浪谱出发，采用适当的海浪谱反演方法模拟海浪，其参数是长期对海洋观测得到，具有较强真实性，缺点是将海面作为高度场建模，即海面上每个点只是一个高度<sup>[3,4]</sup>。本文基于 GPU 的图形绘制技术和算法研究，采用改进的 Gerstner 波物理表达模型的方法，更好的实现了三维场景的绘制，减轻了 CPU 在图形运算方面的负担，增强了场景的真实感和实时性。

## 2. 系统原理

### 2.1. GPU 可编程渲染方式

传统的三维图形管道渲染方式虽然简化了开发流程，但由于处理模式非常固定，处理过程缺乏灵活，开发人员难以实现更加复杂效果的三维模拟，束缚了三维图形开发的性能提升与品质效果。因此，人们在遵循三维开发流程与简化人工操作同时，需要在图形加速硬件中引入更灵活的表现方式来满足人们对开发三维图形特效的需要。

如图 1 所示，在 GPU 编程渲染机制中，以顶点着色器代替管道渲染方式中的模型变换、光照计算以及投影变换等环节，在顶点着色器中通过 HLSL/GLSL 语言实现对每一个顶点的操作序列，可以灵活的计算光照、处理投影以及其它诸方面的计算。由于在 GPU 中采用流水线站数据传递机制，GPU 会自动地将所有顶点数据(包括位置坐标、法向量、颜色、纹理坐标等等)并行地送到顶点着色器进行完全相同方式的处理。这种以灵活的可编程方式代替参数控制的固定管道渲染处理方式极大地提高了对顶点处理的能力，同样

的方式，现在的 GPU 对经光栅化后的像素点阵数据提供了可编程机制来实现针对像素级的编程渲染，在像素着色器中，不仅可以实现灵活多样的多纹理贴图，多场景融合，还可以提供许多更精细的绘制效果，如实现明暗处理模式中将同样的计算放到顶点着色器即实现了 Gouraud 模式的光照填充，而放到像素着色器则可以实现 Phong 模式的填充。

另一个方面，由于采用了流水线数据传输方式，不需要像以前那样在显存中划定专属的存储区来保存点数据，因而它的存储区是完全开放的，如主机内存一样，可以更加方便地实现着色程序的开发。同样，光栅化也从先前单纯的点数据插值填充扩展到任何流水线数据均可以实现自动的插值填充，如法向量或其它因素因子插值填充，为拓展像素处理的能力提供了强有力的支撑。

### 2.2. 常用海洋建模方法

在海浪或水波的模拟方面，归纳起来，其建模方法有几何造型法、物理模型法、海浪谱法和随机海浪建模法四种<sup>[5]</sup>。

#### 1) 几何造型法

所谓几何造型方法就是从海浪的形态出发，采用几何的曲面或者曲线如正弦曲线(面)、Bezier 曲线(面)等来描述海浪的形状。这类方法实现比较简单直观，计算速度较快，但是人为痕迹较为明显，生成的场景不够真实。

#### 2) 物理模型法

在流体力学领域，Navier-Stokes(N-S 方程)方程被用来完整描述不可压缩的粘性流体的运动，通过求解

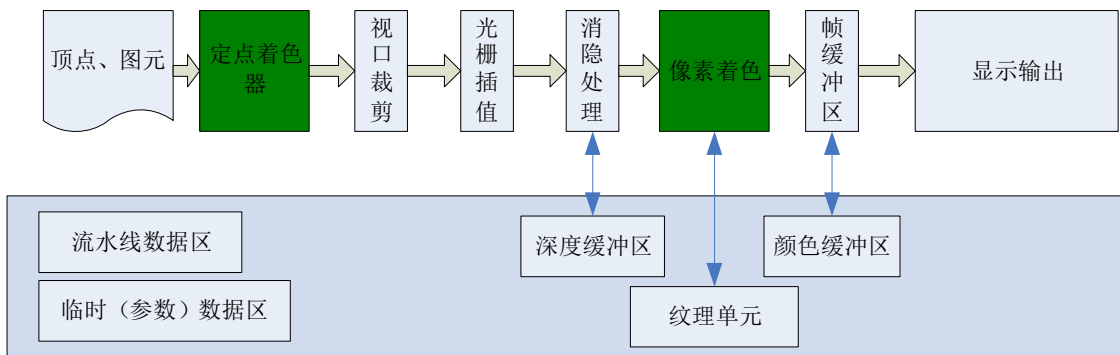


Figure 1. The GPU programming rendering mechanism  
图 1. GPU 编程渲染机制

N-S 方程可以得到流体质点在任意时刻的状态, 进而得到波浪的形态。这类方法能够生成逼真的波浪, 效果比较真实, 适用范围较为广泛, 但是, 求解过程相当复杂, 生成一幅海面场景需要耗费大量的时间。

### 3) 海浪谱法

这类方法不基于任何物理模型, 而是基于对真实海面长期观察所得的统计模, 也就是海浪谱。生成一个与真实海面有相同谱特性的高度场。在使用上这种方法又可以分为两类, 即线性过滤法和线性叠加法。

### 4) 随机海浪建模法

鉴于海浪的随机性和不规则性, 采用常规几何的方法对其进行建模往往人为痕迹过于明显, 在图像上表现过于规则化, 而采用不同频率的噪声函数来构造海面高度场正好能够体现海浪的随机性。这类方法可以产生真实感很强的水波面, 可是 Perlin 噪声的复杂计算对算法效率的影响较大, 而且生成的海浪是随机的, 无固定的方向性, 较适合深海海域的波浪建模。

## 2.3. Gerstner 波模型<sup>[6]</sup>

能最真实地模拟反映海洋场景的方法是基于物理的建模方法, 但是该方法需要求解复杂的非线性方程组, 计算过程复杂, 难以实时地模拟海浪场景。基于频谱统计法生成的海浪形态具有一定真实性, 而且在采用一定加速条件下能够达到系统实时性要求, 但是采用 FFT 计算得到是一块相对区域海面而且假设的这一块区域内海面受同一风速和风向影响, 拼接整个海面场景后具有明显的相似性和重复性, 很大程度上影响这系统的真实感。基于几何建模的 Gerstner 模型真实感相对于频谱统计法弱一点, 但是能基本表达海面波峰陡峭、波谷平坦的形态, 而且绘制整个海域时易于灵活叠加和拼接组合, 计算过程相对简单, 能够达到实时性要求。

Gerstner 波模型是于 1986 年最早被引入图形学领域的水面波形, 其物理模型描述的是水面单个水质点沿圆形轨迹运动, 且剖面形状为摆线, 对于水平位置为  $X_0 = (X_0, z_0)$ , 高度初始值为  $y_0 = 0$  的水质点经过时间  $t$  后的运动位置为:

$$\begin{cases} X = X_0 - (K/k) A \sin(K \cdot X_0 - \omega t) \\ y = A \cos(K \cdot X_0 - \omega t) \end{cases} \quad (1)$$

该式中  $K$  为波运动方向,  $k$  为波数, 其值与波长相关

$k = 2\pi/L$ 。为振动频率, 其值有弥散关系决定。综合线性波叠加方法, 我们可以得出一组波形叠加后的三维波形模型, 表达式如下式(2)所示:

$$\begin{cases} X = X_0 - \sum_{i=1}^N (K_i/k_i) A_i \sin(K_i \cdot X_0 - \omega_i t + \phi_i) \\ \eta(X_0, t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(K_i \cdot X_0 - \omega_i t + \phi_i) \end{cases} \quad (2)$$

## 2.4. Gerstner 波物理表达模型的改进

基于 2.2 和 2.3 中对常用海洋建模方法的研究, 本研究采用的是 Gerstner 波物理表达模型的改进方法。Gerstner 波可以提供一些表面的微妙运动, 该波来源于几何波模拟的雏形, 同时融入了流通物理运动的效果。在海面的表达模型中, Gerstner 波是常用来代替 N-S 方程实现高效动态水面效果的方法。与其它的方法相比, 它有两个显著的特点: 1) 它的法向量容易求取, 方便对水表面进行光效合成与渲染; 2) Gerstner 波能够实现波峰较尖的水浪模拟, 这是正弦波与余弦波所不能做到的。

Gerstner 波实质上也是对几个同性质的波进行叠加合成, 与几何波最大的不同之处是, 它的运动不仅是在高度上的震动, 而且也有水平面上的位移, 只不过它只是在原来点的附近空间作扰动, 这也是与完全流体 N-S 模型的不同之处, 在完全的流体表达模型中, 要求流体中的粒子是在作移动而不是简单的振动、扰动模拟, 可见 Gerstner 波依旧是流体表达模型的一种简化。

为了让 Gerstner 波更好地表达流体的物理效果模拟, 我们引入一些物理运动控制参数并对 Gerstner 波作如下几个方面的拓展:

### 1) 水平方向速度的过渡

复杂波浪看似无序, 但作为合成分量的单个波, 其方向是可以假定为有序的<sup>[7]</sup>, 这样将 Gerstner 波表达中的方向波在水平面上的速度  $V$  来表示, 对速度的表达, 可以以物理运动的特性进行模拟, 如在风力的作用下, 对速度的表达可以表示为:

$$V(t) = V' \quad (3)$$

表达式中,  $\rho$  表示流体的密度,  $F/\rho$  描述的是单位体积流体的加速度, 它是一个二维向量。风通常以风速来表示, 这里只是将方向的表达与物理运动关联起来

实现简单的物理效果模拟。 $V'$  表示波的初始速度，波的水平速度看作是波的速度与外力作用的合成，并假定波的传播速度是不变的。同样在 Gerstner 波的表达式中，用波的速度来实现上下的振动效果，而用合成的水平速度来表示水平方向的扰动。

2) 角速度  $\omega$  与波长  $\lambda$  的关联

给定一个波长，就能很容易地计算出波在表面振动的角速度。

$$\omega = \sqrt{g * \frac{2\pi}{\lambda}} \quad (4)$$

其中  $g$  是重力常数，为国际单位制(例如，9.8 m/s<sup>2</sup>)，这进一步描述了 Gerstner 波的物理特性。由于波速  $V'$  与角速度  $\omega$  之间存在简单的对应关系，因而有：

$$\frac{\lambda}{V'} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (5)$$

由该式可以推导出  $X, Y$  轴上的速度分量公式

$$V'_i = \frac{\lambda_1 * \omega}{2\pi} = \sqrt{\frac{\lambda_1 * g}{2\pi}} \quad (6)$$

这样，

$$V(t) = V' + \frac{F}{\rho}t = \sqrt{\frac{\lambda_1 * g}{2\pi}} + \frac{F}{\rho}t \quad (7)$$

通过引入作用力  $F$ 、波长  $\lambda$ 、流体密度  $\rho$ ，即可将 Gerstner 波用于更真实的物理波模拟。通过对表面上的每一个顶点计算其沿  $X, Y$  轴的偏导数，即可以得到模拟波面两个方向的切线量，通过这两个向量的叉积，即可以确定顶点处的法向量。有了法向量的表达，就可以非常方便地实现光学效果合成与图像渲染，实现诸如物理光学模拟、环境映射等许多高效的、高仿真度的动态水面效果模拟。

2.5. 海面实时光照计算

利用 GPU 支持立体纹理(cube map)映射技术，用它来近似地表示景物表面对周围环境的反射效果。使用立体纹理映射技术来模拟海水周围的天空背景在海面上所产生的整体反射效果。

在渲染海洋表面时，根据光照的 Fresnel 定理来实现，实现光照的反射效果。海水本身具有半透明性，与空气具有不同的折射系数 IOR(index-of-refraction)，形成光子通过介质时产生反射和折射<sup>[8]</sup>，局部光线传

播图如图 2 所示。

由 Fresnel 定理可计算得到折射：

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (8)$$

公式(8)中： $n_1, n_2$  为两介质的折射系数； $\theta_i$  入射角； $\theta_t$  折射角； $\theta_r$  反射角。

由 Fresnel 定理可以计算出太阳光在海面的反射率，见公式(9)所示：

$$\alpha = \left( \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \right)^2 + \left( \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \right)^2 \quad (9)$$

在实现时，使用一维线纹理作为查找表，其范围为 0~255。将法向量和反射向量的点乘结果映射到查找表，从而得到反射纹理。为了避免重叠，法向量和反射向量的点乘结果应限制在 0 和 1 之间。

2.6. 海面 LOD 模型的建立

由于模拟的战场海面场景范围较大，在显示和漫游中，如果不采取简化策略，直接对整幅场景进行绘制，处理起来极为不便，严重影响运行效率和显示速度。为了获得良好的视觉效果，并满足一定的实时性，在构建大范围海面网格时需要引入多分辨率 LOD(layer of details)思想。本研究对大型海面的静态网格表达时，进行了 LOD 细节层次模型的表达，其基本思想如图 3 所示。

“分块”的简化思想，以视点 C 为中心采样点，将整幅大场景划分为若干小块，然后以块为单位，执行数据量简化及场景绘制操作，处理方便灵活，对场

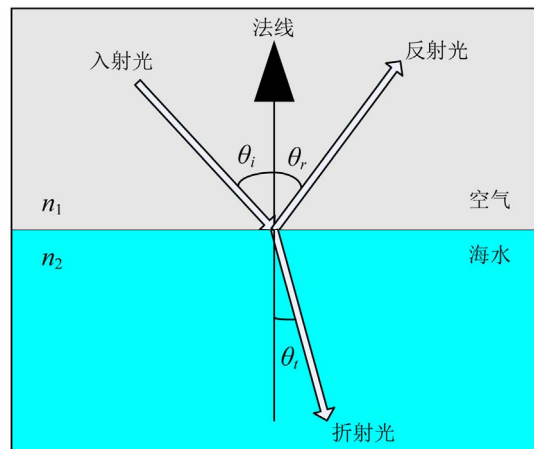


Figure 2. The light from air to water transmission  
图 2. 光线由空气向海水的传播

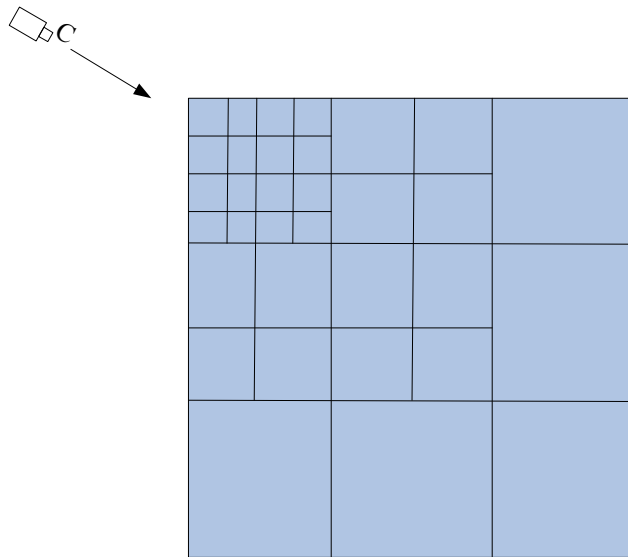


Figure 3. LOD block algorithm  
图 3. 分块 LOD 算法示意

景的操作难度也相应的降低，从而提高了绘制的效率。基于数据格式的海面模型，采用的是均匀的网格模型，由于格式的这个特点，使得“分块”的思想更为合理更易于实现。

概括的说，该算法就是在给定海面高度数据的基础上，对整个大范围地景“分块”，然后以块为单位进行化简，对每一块生成若干个不同详细程度的层次模型，并保存到多模型库中。在绘制时，根据视点视向相关的度量标准，决定各块应调用的模型层次。这种方法能够实现快速的视点剔除与分辨率网格拼接，而不注重其精确度，从而可以高效利用 GPU 强大的绘制功能。在当前的软硬件条件下，基于“分块”的海面网格 LOD 模型算法与传统的基于连续多分辨率模型的算法相比能获得更高的绘制效率。

### 2.7. 海面粒子系统

虚拟海战场环境中船体与水面的特效采用基于 GPU 的粒子系统来表达和优化，根据船体载具的大小、运动速度、方向等特性参数研究出了面向粒子的物理、光学的综合粒子渲染模型。使用 GPU 进行粒子系统绘制的好处有：1) 能够减少粒子系统更新中 GPU 和 CPU 之间的频繁通信、系统内存和显存间的频繁数据传送，充分利用显卡的图形处理能力，降低 CPU 的负担；2) 便于将粒子的光照渲染与物理运动集成进行处理，方便粒子特效效果的快捷实现。

设定在时间  $t$  时刻每一个活动粒子的运动状态、位置与颜色表达，每一个粒子记录诞生的时刻  $t_0$ ，这样粒子的活动时期即可以用  $\Delta T = t - t_0$  来表示。在活动粒子数目不大的情况下，GPU 编程中  $t_0$  可用临时变量来表达，这样必须将这些粒子以时间为序送进队列进行控制，队列的长度决定了粒子的最大可表示数目；在粒子规模非常庞大的情况下，也可以将诞生时刻可作为源设置量分别送到流水线中，这样能够有效地保障粒子系统的渲染效率。在 GPU 的实现中，对时态模拟的表达是非常方便的事情，只需要将绘制状态与系统时间相关联，即可实现动态景观的模拟，这是因为 GPU 的绘制过程与 CRT 的刷新过程是完全一致的，可以认为是基于帧的更新。

### 2.8. 研究的应用

基于 GPU 的海战场环境在 XX 系统作战仿真系统已经得到了应用，图 4 显示了该军用仿真项目的运行画面。真实海战场模拟，大大提高了部队官兵的训练效果。

### 3. 结论

本文基于 GPU 编程开发技术的研究，满足了海洋战场仿真环境对虚拟世界真实性的要求。通过研究明晰了 GPU 编程技术是开发高性能图形系统实现虚拟世界模拟的最佳技术路线。使用它可以进行基本的



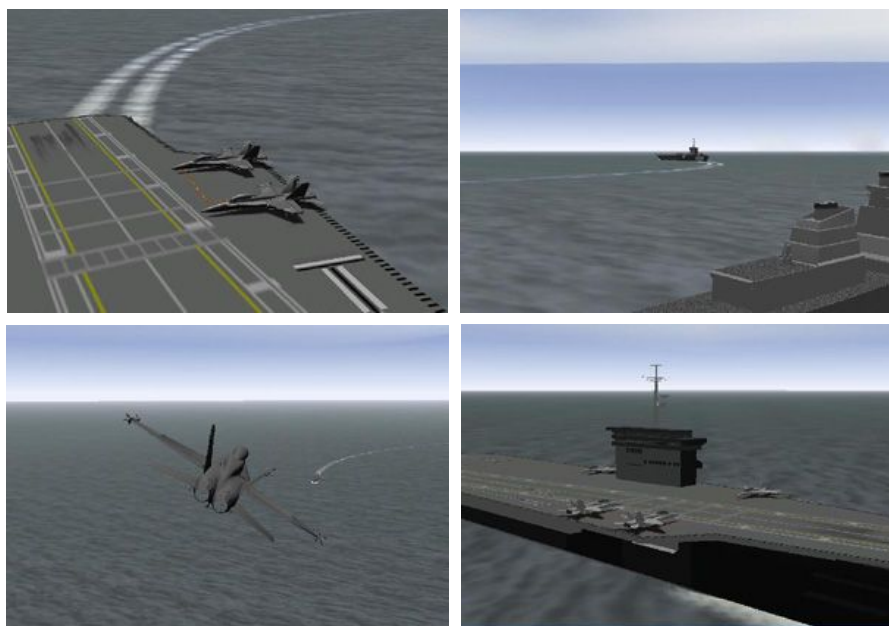


Figure 4. The XX sea battlefield simulation application  
图 4. XX 海战场仿真应用

海上战术演练和模拟作战演习。该研究对于海上作战指挥训练、战法研究、装备性能分析等也具有一定的应用价值。

### 参考文献 (References)

- [1] 蒋庆权. 虚拟现实技术在海军中的应用[J]. 舰船论证参考, 2005: 1-3.
- [2] 周世哲, 满家巨. 基于多重网格法的实时流体模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(7): 935-940.
- [3] 刘洁, 邹北骥, 周洁琼等. 基于海浪谱的 Cersterner 波浪模拟[J]. 计算机工程与科学, 2006, 28(2): 41-44.
- [4] 罗岱, 谢茂金, 曹卫群等. 基于 GPU 编程的地形可视化[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(11): 2244-2249.
- [5] 柳有权, 刘学慧, 吴恩华. 基于 GPU 带有复杂边界的三维实时流体模拟[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 568-576.
- [6] 刘洁, 邹北骥等. 基于海浪谱的 Gerstner 波浪模拟[J]. 计算机工程与科学, 2006, 2: 41-44.
- [7] 徐利明, 姜显明. 基于谱分析的实时波浪模拟[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(9): 2092-2095.
- [8] M. Wand, W. Strasser. Real time caustics. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 611-620.