

Research and Implementation of Generating Technology of Ship Wakes

Fangfang Li*, Sikun Li, Wenke Wang

Laboratory of Virtual Reality, College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha
Email: 183715133@qq.com

Received: Aug. 4th, 2014; revised: Sep. 3rd, 2014; accepted: Sep. 11th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The ship wakes, which are caused by the sailing ship, are a complex hydrodynamic phenomenon. In recent years, as the development of virtual simulation technology, the simulation of ship wakes is used widely for many fields, however the fidelity of the simulation of ship waves is still a key question. Based on the Kelvin wave, this paper puts forward a method for 3D ship waves simulating, which mainly computes the height and the ship wakes points movement according to the ship velocity, sailing time, as well as the distance between ship wakes point and the ship position. The particle emitter model is made according to the length, width and draft length ratio of the warship model, which is used for simulating the ship wakes. Then simulation of the 3D ship waves and ship waves effects generation algorithm are designed and implemented based on OsgOcean platform. The application results reveal that the method has better 3D emulating effects to meet the requirements of applications.

Keywords

Ship Wave, Particle System, OsgOcean, Kelvin Wave

船行波和舰船浪花生成技术研究与实现

李芳芳*, 李思昆, 王文珂

国防科学技术大学计算机学院虚拟现实实验室, 长沙
Email: 183715133@qq.com

*通讯作者。

收稿日期：2014年8月4日；修回日期：2014年9月3日；录用日期：2014年9月11日

摘要

舰船海面行驶时产生的船行波和浪花是一种复杂的水动力现象。近年来随着虚拟仿真技术的不断发展，舰船航迹的模拟仿真在许多领域有着越来越广泛的应用，但是如何逼真的模拟船行波以及舰船浪花仍是困扰我们的关键问题之一。本文提出一种基于开尔文波的三维船行波模拟方法，该方法依据舰船的航行速度和时间，以及船行波轨迹上的位置点与舰船的距离计算船行波轨迹点的高度值以及轨迹点运动；根据舰船模型的长度、宽度以及舰船的吃水长度比，建立粒子发射器模型，模拟船只运行中的头浪、艉浪。基于OsgOcean海浪模拟平台，设计实现了三维船行波的模拟和舰船浪花特效生成算法，取得了较好的仿真模拟效果，满足了应用需求。

关键词

船行波，粒子系统，OsgOcean，开尔文波

1. 引言

海浪是海洋中的一种重要现象，蕴含了大量的信息。船舶在海面上运行时，船体推挤水体产生压力变化而形成的水面波称为船行波；船舶行驶过程中，船体与水体碰撞、叶轮与水体相互作用产生飞溅浪花，形成艏浪、侧浪、艉浪；这些现象统为舰船航迹[1]。海浪和舰船航迹形态不规则，是一种复杂的水动力现象，其运动形态既有随机性又有规律性。很难用一个简单模型对其进行模拟。

2. 研究现状

在三维航海和三维海战虚拟仿真中，海面波浪以及舰船航迹的生成效果对虚拟仿真的真实感[2]和应用效果有直接影响，因而自二十世纪80年代初以来，人们不断地对海浪和舰船航迹的建模和绘制技术进行深入研究。在海面波浪生成技术研究已取得多项高水平研究成果，具有代表性的论文海浪建模和绘制技术研究论文有文献[3]-[5]等，具有代表性的开源海浪模拟软件有OsgOcean。在舰船航迹的建模和绘制研究中已提出多种方法。近年来，针对船行波轨迹，Jerry[3]运用Iwave方法模拟出可以交互干扰的水面，但此算法比较复杂而且实时性较差；Goss[6]、Ding[4]等人基于Goss方法简化船行波，结合粒子方法，此方法实现简单，但效果欠佳；王琪[7]等人采用粒子系统对舰船艏浪进行模拟，效果欠佳；Ma等人[8]基于OSG采用粒子系统方法和V型波方法对舰船航迹进行模拟，但是效果不好；Cem[9]等人提出了“波浪粒子”概念并基于这一概念模拟了船舶运动中引起的水面变形情况，取得一定的效果，但是未考虑浪花且此方法主要应用于水域情况比较简单的情形之下，对以风场为驱动力的海面高度场上船行波模拟较困难；陆志慧[5]采用粒子系统方法模拟舰船的艏浪和艉浪，得到较好效果，但是未考虑船行波和舰船模型对艏浪及艉浪粒子系统模型的影响；Liu等给予PML(Perfectly Matched Layers, 最优匹配层)方法模拟舰船与水面作用的波形轨迹，但是此方法采用圆环对波形轨迹进行模拟，效果与实际不太符合[10]。以上的舰船浪花模拟只是针对某一种类型船只在视觉效果上进行模拟，未考虑自适应建模以及舰船浪花的微观物理运动。

本文重点研究了船行波和舰船浪花建模与绘制方法，首先提出一种基于开尔文波的三维船行波的模拟方法，该方法依据舰船的航行速度和时间，以及船行波轨迹上的位置点与舰船的距离计算船行波轨迹点的高度值以及轨迹点运动，可生成和实际船行波形相似的效果，随后基于粒子系统的舰船浪花模拟是

根据舰船模型的长度、宽度以及舰船的吃水长度比,建立粒子发射器模型,模拟船只运行中的头浪、舰浪。实现结果表明,该方法模拟结果具有良好的真实性。

3. 三维船行波轨迹生成

三维船行波轨迹的定性特征与二维船行波的定性特征非常一致,三维船行波轨迹点的平面投影位置可根据二维船行波理论进行计算。根据二维船行波理论[11],当船舶以等速度在平静的深水域作直线运动,下游存在以相速度 $c = u$ 传播的波浪,此波浪是振幅为 A 的小振幅波,在运动坐标系即把坐标系固连于扰源上(在平静水面上运动的船只是扰源),则此波的波面方程为: $\xi_1 = A \cos(kx + \varepsilon)$,其中 $k = g/c^2 = g/U^2$,为重力加速度, ε 是位相角可以任意设定。

3.1. 开尔文波理论

开尔文波[11]是扰源运动中产生的波动现象,这种现象与船舶航行时形成的波系具有相同的定性特征,因此常作为模拟船行波的理论基础。开尔文波中主要计算波峰线上轨迹点坐标:

$$\begin{cases} x = X \cos \theta \left(1 - \frac{1}{2} (\cos \theta)^2 \right) \\ y = \frac{1}{2} X (\cos \theta)^2 \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

其中, x 表示扰源相对原点的运动距离,反映了扰动波系中波间隔的大小;如图1, x 轴为扰源移动方向, θ 表示扰源形成的平面行波的传播方向与扰源运动方向所成的夹角, $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。

3.2. 基于开尔文理论的三维船行波模拟方法

以开尔文理论为基础,依据运动坐标系中定常波动特性和群速度概念描述二维船行波的定性特征,二维船行波中波峰线的轨迹方程采用方程(1),扰源与船行波轨迹点的连线与扰源运动轨迹的夹角的最大值为 19.5° [12],此波系如图2, $p(x, y, z)$ 是扰源的当前位置点。

如图2所示,三维船行波轨迹点在 xoy 平面上的投影与二维船行波定性特征较一致,本文中三维船行波轨迹点坐标计算:首先根据计算轨迹点在 xoy 平面上的投影点坐标,然后根据船行波波高公式进行计算船舶行驶中引起的波高值,即修正轨迹点的 z 值。

三维船行波轨迹点的投影点坐标 x 、 y 值计算:根据船行波波系中最大扇形半张角为 19.5° ,此时的轨迹点波向角 $\theta \approx 35^\circ$,假如船行波轨迹上一点 A ,其与船舶当前位置点的连线与船舶行进方向之间夹角为 α ($\alpha \in (0, \pi/9)$),如图3所示,则波向角 θ 和 α 角之间的关系式: $\theta = 35^\circ - (19.5^\circ - \alpha)$ 。图4中 A_0 表示某一时刻 t 时船舶所在位置; S 表示船舶当前所在位置; A 点表示船舶运动到 S 点时,在 A_0 位置时所产

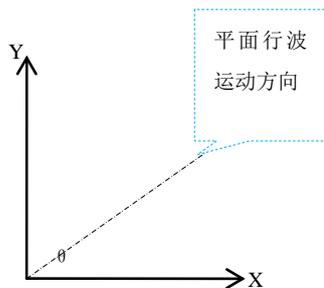


Figure 1. The reference frame of Kelvin
图1. 开尔文波坐标系

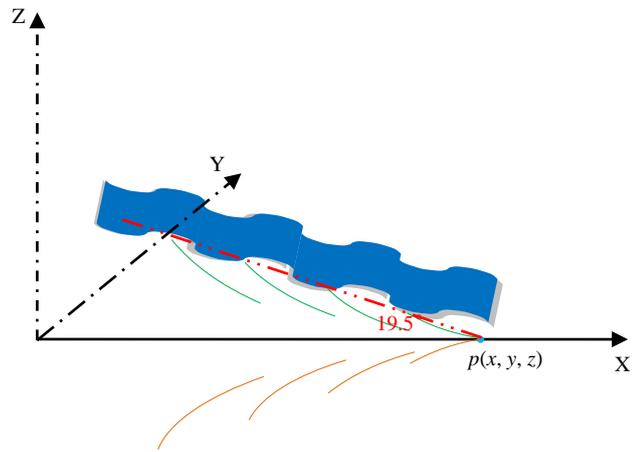


Figure 2. 3D ship waves sketch map
图 2. 三维船行波示意图

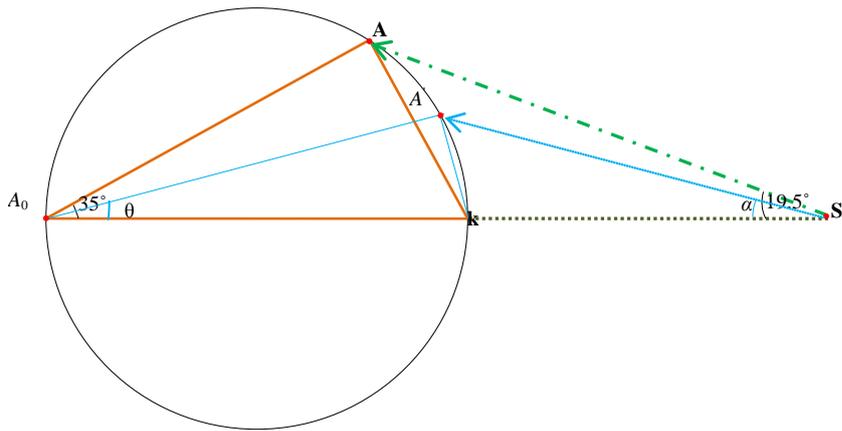


Figure 3. The spreading angle of ship wave point
图 3. 船行波轨迹点波向角

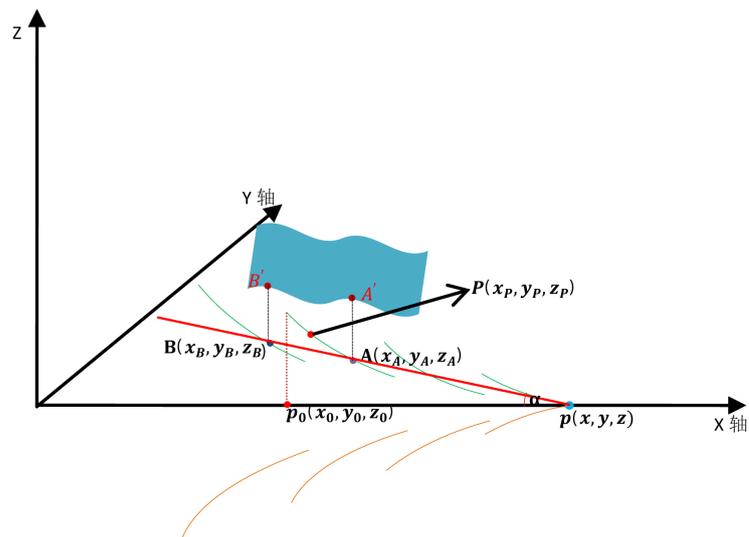


Figure 4. 3D ship waves coordinate sketch map
图 4. 三维船行波坐标示意图

生的船行波传播的最远距离点；A' 表示当船只运动到 S 点时，A 点产生的沿 θ 角传播的船行波的当前位置点；K 点为 A 点产生的船行波沿船舶运动方向运动的当前位置点。

如图 4 中所示，船舶当前位置点为 $p(x, y, z)$ ， t_0 时刻船舶的位置点为 $p_0(x_0, y_0, z_0)$ 则两点之间的距离

$$X = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (2)$$

运动船舶船行波轨迹点计算时，把运动船舶的位置点看做计算坐标系的原点， p_0 位置产生的船行波运动到 P 点时，由于船行波波系中波的传播速度是船舶行驶速度的一半，则距离 $X_1 = X/2$ ，此时角度为 α 的波峰点 P 的坐标：

$$P(x_p, y_p, z_p) = \left(X_1 * \cos\theta^* \left(1 - \frac{1}{2} (\cos\theta^*)^2 \right), \frac{1}{2} X_1 (\cos\theta^*)^2 \sin\theta^*, 0.0 \right) \quad (3)$$

其中 $\theta^* = 35^\circ - (19.5^\circ - \alpha)$ ， α 角度范围值的确定：当船行波刚形成时即与船舷距离较小时 $\alpha \in (0, 19.5^\circ)$ ，假设船行波从产生经过 T 时间后消失，则船行波在产生 t 时间后 α 取值为： $\alpha \in \left(19.5^\circ * \frac{t}{T}, 19.5^\circ \right)$ 。此方法仅计算出船行波轨迹点的 x 、 y 坐标值，对 z_p 值的修正为： $z_p = H + h'$ ，其中 H 是船舶航行中引起的波高， h' 是对波高值进行修正的较小数值；

$$H = 0.1448 * V^2 * \left(\frac{d}{L} \right)^{0.5} * \left(1 - \frac{1}{n} \right)^{-2.5} * \exp \left(-0.588 \frac{s\sqrt{gh}}{V} \right) \quad (4)$$

其中 V 为船舶速度， d 为船舶吃水深度， L 为船舶长度， n 为航道断面系数 ($4 < n < 20$)， s 为计算位置点距离船舷(船体两侧)的距离， h 为航道水深，船舶在海面上航行时， h 值一般为 1000 左右，波高计算公式中的 $\exp \left(-0.588 \frac{s\sqrt{gh}}{V} \right) \approx \varepsilon$ ，其中 $\varepsilon < 1.0$ 是常数；不同船舶类型的吃水与长度比值 d/L 不同：航母的 d/L 值为 $(1/35 \sim 1/30)$ ，驱逐舰约为 $(1/25 \sim 1/20)$ ，其它船舶在 $1/15$ 左右； n 值与船舶航行阻力密切相关，国内外研究成果认为 $n = 7$ 最经济合理，当 n 值继续增大时对阻力影响不明显，同时 n 值会随着船速的提高而增大；则

$$H \approx 0.1448 * V^2 * \left(\frac{d}{L} \right)^{0.5} * \left(1 - \frac{1}{7} \right)^{-2.5} * \varepsilon \quad (5)$$

以上是基于运动坐标系的船行波轨迹点计算方法，将其转换到全局坐标系中，则空间位置 $p_0(x_0, y_0, z_0)$ 处船行波轨迹点的空间坐标计算方程为：

$$\begin{cases} X = x_0 + \sqrt{dx^2 + dy^2} \cos(\varphi) \\ Y = y_0 + \sqrt{dx^2 + dy^2} \sin(\varphi) \\ Z = H + h' \end{cases} \quad (6)$$

其中 $dx = x_p$ ， $dy = y_p$ 为轨迹点在运动坐标系中的坐标， φ 为波峰点波向角的修正值 $\varphi = \theta + \sigma$ ， σ 为船舶航向角。考虑波浪的动态特性，船行波会随着船舶运动高度发生变化，同时向远处传递，高度表达式为： $Z_p = Z_p/t$ ， $t > 1.0$ 是船行波存在时间， Z_p 为船行波产生时的波高： $X_p = X + x' * t$ ， $Y_p = Y + y' * t$ 其中 x' ， y' 分别为船行波单位时间内在 x ， y 方向的运动分量。

计算得到船行波轨迹中波峰点坐标值以后，本文中对波峰轨迹线之间轨迹点的坐标计算，如图 5 所

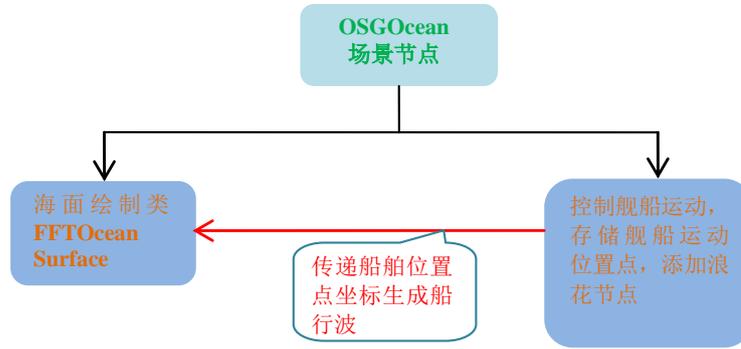


Figure 5. The realization of method through OsgOcean
图 5. OsgOcean 平台上的方法实现

示, A、B 两点是与船舶行进方向夹角为 α 的射线和两个相邻波峰轨迹线的交点, 则两点之间轨迹点坐标值的计算方法为: 假设 A 点坐标 (x_A, y_A, z_A) , B 点坐标为 (x_B, y_B, z_B) , 对它们之间的线段进行四等分, 三个采样点为 A_1, A_2, A_3 它们的坐标为 $A_i = (x_i, y_i, z_i)$ 其中 i 表示采样点下标, 取值为 1, 2, 3; $dp = (x_A - x_B, y_A - y_B, z_A - z_B)$ 表示 A, B 两点之间的坐标差值, 则

$$\begin{cases} x_i = x_A - i/4.0 * (x_A - x_B), & i = 1, 2, 3 \\ y_i = y_A - i/4.0 * (y_A - y_B), & i = 1, 2, 3 \\ z_i = z_A/2.0, & i = 1 \\ z_i = -(z_A + z_B)/2.0, & i = 2 \\ z_i = z_B/2.0, & i = 3 \end{cases} \quad (7)$$

得到波峰点坐标以及波峰轨迹线之间轨迹点的坐标, 再进行船行波轨迹点 (x_j, y_j, z_j) 在海面高度场网格中的对应位置, 假设海面高度场中原点位置坐标为 (X_0, Y_0) , 采样点空间坐标转换到海面高度场局部坐标,

$$\begin{cases} \text{surfaceX} = -X_0 + x_j \\ \text{surfaceY} = Y_0 - y_j \end{cases} \quad (8)$$

海面高度场局部坐标对应到海面高度场网格点坐标,

$$\begin{cases} ix = \left(\text{surfaceX} - \text{floor} \left(\frac{\text{surfaceX}}{\text{tileResolution}} \right) * \text{tileResolution} \right) / \text{ptSpacing} \\ iy = \left(\text{surfaceY} - \text{floor} \left(\frac{\text{surfaceY}}{\text{tileResolution}} \right) * \text{tileResolution} \right) / \text{ptSpacing} \end{cases} \quad (9)$$

其中 ix, iy 分别表示采样点所在网格对应的行列数, tileResolution 代表海面场景的实际分辨率, ptSpacing 表示网格点之间的实际间距, $\text{ptSpacing} = \text{tileResolution} / \text{tileSize}$, tileSize 表示大小为 tileResolution 区域中的网格数目。

3.3. 三维船行波模拟算法

依据以上三维船行波理论方法分析, 本文主要设计 $\text{CalculateCurrentWave}()$ 算法实现三维船行波模拟。主要算法流程为:

Input: 舰船运动经过的点坐标; 运动开始时间; 舰船速度
算法 $\text{CalculateCurrentWave}()$:

```

If(轨迹点刚产生)
{计算轨迹点离舰船当前位置点距离;
计算运动轨迹波峰点高度值;
计算两波峰轨迹点之间采样点高度值;
}
else
{计算轨迹点存在时间;
计算轨迹点离舰船当前位置点距离;
计算运动轨迹波峰点高度值并除以时间;
计算两波峰轨迹点之间采样点高度值;
}
Output: 考虑船行波影响的海面网格高度值

```

4. 基于粒子系统的舰船头浪、侧浪与尾浪生成

船行波轨迹计算中只模拟出舰船行驶中引起的海面变形效果，未实现模拟波浪叠加、破碎等产生的浪花效果，本文中采用粒子系统方法模拟舰船运动过程中产生的头浪、侧浪和尾浪。

船舶在海面上运动时，与海面接触部分形成水线面，本文中基于文献[8]中方法把此水线面简化为一个与船舶长度、宽度和船型有关的椭圆。椭圆的长半轴为 a ，短半轴为 b ；船舶的长度为 L ，宽度为 d ，船舶船型参数 $\varepsilon = d/L$ ，则椭圆长短半轴与船舶长宽度和船型的关系：

$$a = k * \frac{L}{2.0}$$

其中 $k = 0.985$ 为调节参数，可根据船型调节， $b = a * \varepsilon$ 船舶为航母、军舰时 $\varepsilon \approx 1/20.0$ ，船舶为较大货船或客船 $\varepsilon \approx 1/11.0$ ，船舶为快艇或其它较小船只时 $\varepsilon \approx 1/3.0$ 。以船舶运动的位置点为椭圆中心，以 a 为长半轴，以 b 为短半轴，以角度范围为 $(-\delta, \delta)$ 的弧状粒子发射器，模拟舰船头浪， δ 取值可根据船型参数进行确定 $\delta = (1 - \varepsilon) * \frac{\pi}{2.0}$ 。

侧浪和尾浪结合头浪的浪花模拟，通过观察实际船型轨迹效果和借鉴其它模拟方法，本文重要采用粒子系统中自定义的椭圆型粒子发射器和锥体粒子发射器，实现对船体碰撞产生的浪花和船舶螺旋桨与水体作用产生的浪花的模拟。由于运动舰船产生的浪花在一定时间内会消失，本文采用 `osg::sequence` 类方法控制舰船运动中产生粒子系统的存在时间，从而实现浪花的产生和消失。

每个粒子发射器的位置随着舰船位置的移动而发生改变，即粒子发射器的位置 $p_e(x, y, z) = P(x_b, y_b, z_b) + p'$ ，其中 P 是运动舰船的位置， p' 粒子发射器与舰船位置点之间的差值。粒子的初始速度 V_0 ，粒子从发射器发出后在重力作用下沿抛物线轨迹运动，运动轨迹方程为 $s = V_0 t - \frac{1}{2.0} g t^2$ ，每个粒子的速度方向与 z 轴夹角为 ϑ ，速度方向在 xoy 平面上的投影与 x 轴的夹角为 φ ，则粒子在 x, y, z 方向的速度分量：

$$\begin{cases} V_{x0} = V_0 * \sin \vartheta * \cos \varphi \\ V_{y0} = V_0 * \sin \vartheta * \sin \varphi \\ V_{z0} = V_0 * \cos \vartheta \end{cases} \quad (10)$$

粒子 t 时刻的位置可根据粒子在各个方向的速度分量进行计算：

$$\begin{cases} X = x + V_{x0} * t \\ Y = y + V_{y0} * t \\ Z = z + V_{z0}t - \frac{1}{2.0}gt^2 \end{cases} \quad (11)$$

5. 实验设计与实现

为了验证本文算法的有效性，基于 OsgOcean 平台进行仿真实验。实验的软件环境为 Windows 7 系统，VisualStudio2010 和 OsgOcean；硬件环境为 Intel CPU i5 3.20 GHz、8.00 GB RAM。

OsgOcean 主要采用基于海浪谱的快速傅里叶变换方法对海面进行模拟绘制，本实验主要在 OsgOcean 场景节点中添加控制舰船运动的节点，然后把舰船运动位置反馈回 OsgOcean 中海面绘制类中 FFTOceanSurface 类中，实现舰船航行波的模拟绘制，同时利用粒子系统理论向 OsgOcean 场景中添加模拟舰船头浪、艉浪和侧浪的粒子系统节点，如图 5 所示。

图 6(a)给出了使用本文算法实现的船行波和舰船航迹浪花仿真效果图，该图利用粒子系统的自定义形状模拟浪花，图 6(a)是文献[8]算法的仿真效果。

图 7(a)给出使用本算法模拟两艘舰船的船行波效果图，图 7(b)是现实中运动舰船的船行波图像。



(a)



(b)

Figure 6. Ship wakes simulation contrast results

图 6. 船行波轨迹模拟效果对比图

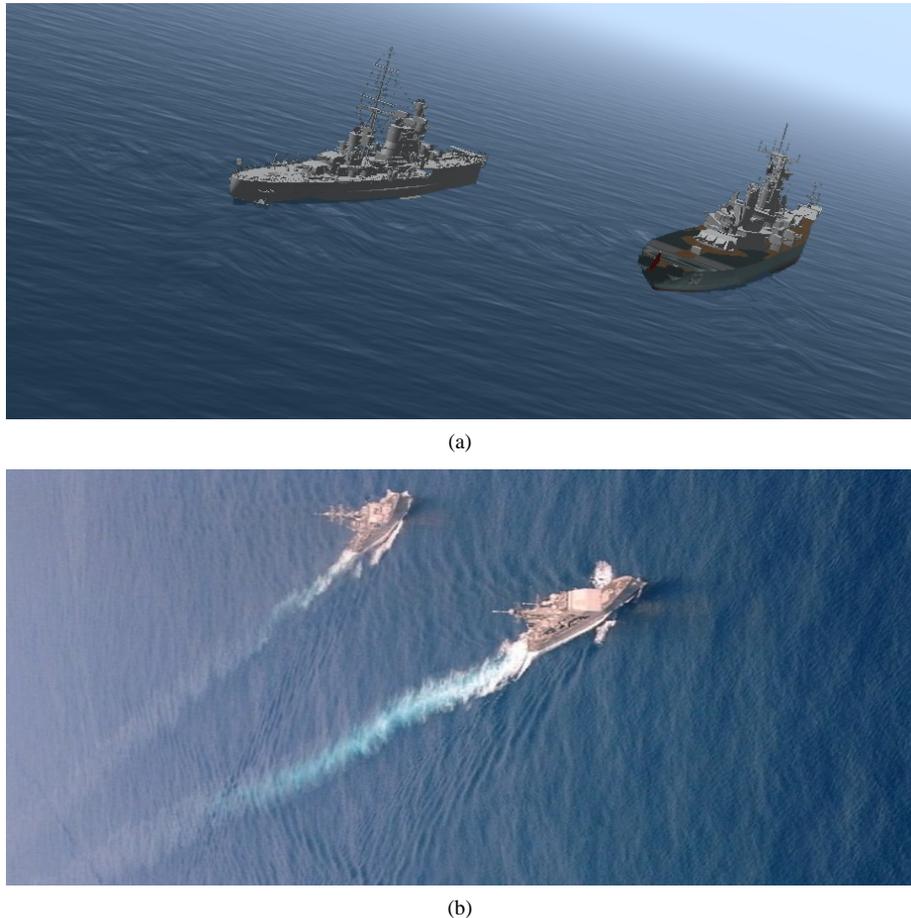


Figure 7. Ship waves emulation contrast results
图 7. 船行波模拟效果对比图

6. 结束语

本文基于 OsgOcean 平台对海洋环境进行仿真,采用粒子系统技术对舰船航迹中的头浪、尾浪和侧浪进行研究模拟,基于二维船行波理论对三维船行波进行建模绘制,与已有舰船航迹模拟方法相比,本文的方法仿真模拟效果更符合实际。本文中对舰船头浪、尾浪和侧浪模拟的粒子系统方法,相对比较简单,没有考虑现实的复杂因素影响,有待改进。复杂和不规则的舰船航迹模拟一直是一项重大课题,还需更加深入地进行探索和研究。

致 谢

在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是国防科技大学计算机学院的李思昆教授,以及虚拟现实实验室同学和老师表示感谢。

基金项目

国家自然科学基金 No. 61272009, 国家自然科学基金(61202335)。

参考文献 (References)

- [1] 赵欣, 李凤霞, 战守义 (2008) 基于粒子系统的舰船航迹仿真. *计算机工程*, **15**, 22-24.

- [2] 马天, 黄建国, 王汝夯, 张群飞 (2011) 应用水波弥散特性的舰船航迹三维可视化新方法. *西安交通大学学报*, **8**, 49-53.
- [3] Tessendorf, J. (2004) Interactive water surfaces. *Game Programming Gems4*. Charles River Media, Hingham, 265-274.
- [4] Ding, S.J. (2008) Research on generating technique of virtual ocean environment and special effects. Harbin Engineering University, Harbin.
- [5] 陆志慧 (2005) 大规模虚拟战场环境中海洋场景的建模与绘制技术研究. 硕士论文, 国防科技大学, 长沙.
- [6] Goss, M.E. (1990) A realtime particle system for display of ship wakes. *IEEE Computer Graphics & Applications*, **272**, 30-35.
- [7] 王琪, 邓会亨, 马璐 (2013) 基于粒子系统的海洋环境仿真. *计算机系统应用*, **2**, 231-233, 226.
- [8] Ma, T., Huang, J.G. and Zhang, Q.F. (2013) Ship wakes 3D simulation based on OSG. *IEEE Region 10 Conference* (31194), 22-25 October 2013, 1-3.
- [9] Yuksel, C., House, D.H. and Keyser, J. (2007) Wave particles. *ACM Transactions on Graphics*, **26**, 3.
- [10] Liu, S.G. and Xiong, Y. (2013) Fast and stable simulation of virtual water scenes with interactions. *Virtual Reality*, **17**, 77-88.
- [11] 夏国泽 (2003) 船舶流体力学. 华中科技大学出版社, 武汉.
- [12] Rabaud, M. and Moisy, F. (2013) Ship wakes: Kelvin or mach angle? *Physical Review Letters*, **110**, Article ID: 214503.