

应用水波弥散特性的舰船航迹三维可视化新方法

马天, 黄建国, 王汝奔, 张群飞

(西北工业大学航海学院, 710072, 西安)

摘要: 针对三维海洋仿真中舰船航迹再现的实时性与显示效果之间的矛盾, 提出了一种应用水波弥散特性的可视化新方法. 该方法将水面波的弥散特性应用到船首产生破浪的运动建模中, 建立了简化的船行波粒子系统模型; 然后根据船尾航迹的宽度距离扩散规律, 建立了尾部航迹的粒子系统模型, 并采用后续渲染技术实现跟海面的融合; 最后基于开放场景图粒子系统, 在 VS2005 平台对新方法进行具体实现. 水声对抗仿真系统中的实际应用表明, 新方法更符合物理运动规律, 对整个系统帧速的影响小于 1 帧/s, 有更好的实时性和显示效果.

关键词: 弥散特性; 舰船航迹; 三维视景仿真; 开放场景图; 粒子系统

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)08-0049-05

New Visualization Method for Ship Wakes Applying Water Wave's Dispersive Nature

MA Tian, HUANG Jianguo, WANG Ruhang, ZHANG Qunfei

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A new visualization method for ship wakes applying dispersive nature of water wave is proposed to solve the contradiction between real-time and display effect in ocean scene simulation system. The surface dispersive nature of water wave is used to establish the motion model of bow waves, and then the bow wake's particle system model is built. The shape-like particle system model is built based on the distance-width spread discipline of stern wake, and the post-rendering technique is used to merge with sea surface. Then all these models are realized on VS2005 platform based on open scene graph's particle system. The application results in an acoustic confrontation simulation system show that the method has better performance in real-time and display effect since the method is in more accordance with the physical law and its impact on the system frame rate is less than 1 per second.

Keywords: dispersive nature; ship wakes; 3D visual simulation; open scene graph; particle system

在实时三维海洋环境仿真中, 舰船航行引起的水面动态效果(即航迹)会直接影响仿真的真实感. 舰船航迹主要有 Kelvin 船行波航迹、湍流或旋涡航迹、表面窄 V 字形航迹、内波航迹等, 其中以前两种航迹对视觉效果的影响最大. 近年来, 在虚拟海洋视景仿真中出现了很多针对舰船航迹的实时三维可

视化研究. Jerry^[1]运用 Iwave 方法建立可以交互干扰的静态水面, 算法比较复杂, 实时性较差. 还有一类是针对舰船航迹的不规则性和内在复杂性, 通过分析简化航迹模型, 基于粒子系统的实现方法. 比较典型的是基于 Goss 方法^[2-5]建立粒子的初始速度向量, 对船行波简化近似, 实现非常简单, 但效果欠佳.

收稿日期: 2010-11-10. 作者简介: 马天(1982—), 男, 博士生; 黄建国(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972152).

网络出版时间: 2011-07-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110718.1806.009.html>

赵欣等^[6]、胡一笑等^[7]根据 Kelvin 船行波模型建立粒子初始位置和随机发射速度,效果更真实些. 虞宏毅^[8]通过将多个粒子图样渲染成高度场纹理,作用于水面高度场实现航迹效果. 但是,这类方法都没考虑到产生航迹水粒子的微观物理运动,只是在视觉上的模拟.

本文在吸取以上方法优点的基础上,把舰船航迹分为船首破浪产生的 V 形船行波航迹和湍流等产生的尾部航迹来分别建模,提出将水面波的弥散物理特性应用到船首产生破浪的运动建模,进而建立简化的船行波粒子系统模型. 对船尾航迹,则忽略湍流等具体因素,通过分析其形状对尾部航迹建模,并采用后续渲染技术实现与海面的融合. 最后,基于开放场景图(OSG)粒子系统和 VS2005 平台对本文方法进行了具体实现,通过对航迹生成代码的封装,留下控制航迹的主要参数接口,使此航迹系统可根据需要自由设置,并可方便地移植到各种三维海面仿真系统中.

1 船首船行波航迹建模

当物体运动的速度大于水波的速度时,由于水流与船体的碰撞,引起水流速度和压力的变化,因而在船体周围连续不断产生新的波浪^[4](包括一组横波和一组斜波),波浪的相互叠加在舰船两侧形成 V 形羽状航迹,即船行波,属于长重力波^[7]. 这种波的经典模型理论是流体力学中的 Kelvin 波理论,该模型非常严格,但也很复杂,计算量非常大. 因此,本文从水面波的弥散特性出发,用更简单明了的方式解释船行波.

1.1 基于水波弥散特性的简化船首船行波模型

(1)深海水波表面的弥散特性^[9]. 假设水波的相速度为 c ,表面粒子做半径为 R 的圆周运动,其向心加速度设为 $\omega^2 R$,速度为 ωR . 考虑表面上一个小的流体朝右运动,在波峰处,水波是向前移动的,同时加速度是向下的,则其波峰处的相速度为 $c + \omega R$,向右运动半波长后,粒子向后运动,此时水波仍以相同速度向前运动,此时小流体的相速度为 $c - \omega R$,根据伯努利方程可得

$$\frac{\rho(c + \omega R)^2}{2} = \frac{\rho(c - \omega R)^2}{2} + \rho g 2R \quad (1)$$

由上式可得

$$\omega = \frac{g}{c} = (gk)^{1/2} \quad (2)$$

式中: ρ 为水体密度; c 为相速度; ω 为水波频率; g 为

重力加速度. 也就是说,水波的相速度仅与重力加速度和水波频率有关,这就是深水长重力波(小振幅重力决定正旋水波)的弥散特性. 由于水波波长为

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可推出

$$c = \left(\frac{g\lambda}{2\pi}\right)^{1/2} = \left(\frac{g}{k}\right)^{1/2} \quad (4)$$

所以,波长越大的水波运动越快,根据式(2)可以得到水波群速度为

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{2} \left(\frac{g}{k}\right)^{1/2} = \frac{1}{2} c \quad (5)$$

式(5)说明深水重力水波的群速度是相速度的一半.

虽然上述公式是在理想流体、水底和波形的假设下得到的,但与实际的波速非常近似. 下面根据上述公式表示的深水水波的弥散特性,来分析船行波 V 形航迹.

(2)船首船行波 V 形航迹. 为了简化问题,考虑船首一个以固定的速度 v_0 运动的点源,这个点源会产生一连串不同波长的圆形波. 为了获得 V 形航迹,所有考虑的波的相速度都必须比点源的速度 v_0 小,其相速度都满足式(4),所以不同波长圆形波的运动方向和速度不同,如图 1 所示.

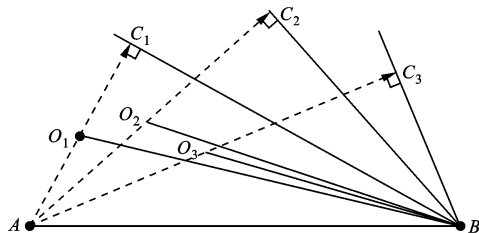


图1 不同波长圆形波的运动示意图

考虑中间波长的波在点 A 处产生,当船运动到点 B 处时,其波相运动到了点 C 处,由于群速度是相速度的一半,真正的水波运动到 AC 的中点 O 处,如图 2 所示. 假设运动时间为 t ,因为是圆形波,BC 与波圆相切于 C 点,即 AC 垂直于 BC,所以可得

$$ct = v_0 t \sin \theta \quad (6)$$

即

$$c = v_0 \sin \theta \quad (7)$$

假设 AO、CO 的长为 x , AB 长为 1,则 AC 长就是 $2x$,则有

$$\theta = \arctan(2x) \quad (8)$$

$$\theta - \varphi = \arctan x \quad (9)$$

由式(8)、(9)可得

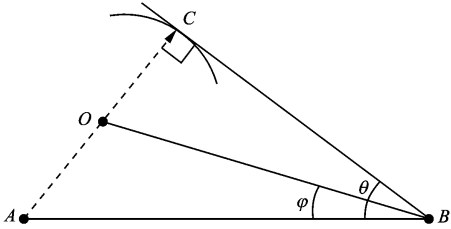


图 2 圆形波弥散特性示意图

$$\varphi = \arctan(2x) - \arctan x \tag{10}$$

由公式

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{2}{1+(2x)^2} - \frac{1}{1+x^2} = 0 \tag{11}$$

可解得 $x \approx 0.71$, 此时 $\varphi \approx 19.47^\circ$ 最大, $\theta \approx 54.74^\circ$, 对应波的相速度为 $0.82v_0$, 波长 λ_0 为 $0.43 \frac{s^2}{m^2} v_0^2$. 波长在 λ_0 附近的波产生的航迹基本上都在 19° 左右, 这就是我们看到的船行波 V 形航迹. 船速越快, 产生波的波长就越长, 航迹也拉得越长, 但是航迹与航向的夹角基本保持一致.

1.2 船首船行波粒子系统建模

(1)船首船行波粒子系统初始化. 因为船首船行波两侧是对称的, 所以粒子是同时朝左、右两个方向成对发射的, 一次分别发射 100 个, 左、右各 50 个. 假设船尾在 原点处 $(0,0,0)$, 船长为 L , 舰船沿 X 轴运动, 船头处浪高为 H (可通过海面网格在船头 $(0,L)$ 处的波高获得), 则船首粒子发射的初始位置为

$$\left. \begin{aligned} x_0^f &= L \\ y_0^f &= 0 \\ z_0^f &= H \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

根据船行波的弥散特性, 可作进一步简化. 因为 $\theta \approx 54.74^\circ$ 时, 对应的 $\varphi \approx 19.47^\circ$ 最大, 为了模拟各种不同波长形成的羽状 V 形航迹, 本文对 θ 分别在 $[10^\circ, 80^\circ]$ 和 $[-10^\circ, -80^\circ]$ 范围内随机取值 $\text{rand}\theta$, 这样就可以确定船首左、右两个方向粒子的初始速度 v^f 为

$$\left. \begin{aligned} v_x^f &= \frac{1}{2} v_0 \sin(\text{rand}\theta) \cos(\text{rand}\theta) \\ v_y^f &= \frac{1}{2} v_0 \sin(\text{rand}\theta) \sin(\text{rand}\theta) \\ v_z^f &= r_1 v_x^f \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

式中: r_1 为 $(0,1)$ 间的随机数; 根据粒子的 X 方向速度 v_x^f 随机生成粒子的垂直速度 v_z^f . 粒子发射后, 只受重力加速度 g 的影响, 所以其加速度为

$$\left. \begin{aligned} a_x^f &= 0 \\ a_y^f &= 0 \\ a_z^f &= -g \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

初始生命值 $l^f = 2 \text{ s}$.

(2)船首船行波粒子系统更新. 粒子以速度 v^f 和加速度 a^f 运动 t 后, 其位置更新为

$$\left. \begin{aligned} x_t^f &= x_0 + v_x^f t \\ y_t^f &= y_0 + v_y^f t \\ z_t^f &= z_0 + v_z^f t - \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

粒子生命值更新为

$$l_t^f = 1 - r_l t \tag{16}$$

式中: r_l 为 $(0.000 \ 1, 0.001)$ 间的随机数, 用来随机更新粒子的生命.

(3)船首船行波粒子消亡控制. 当粒子的生命值 $l_t^f < 0.000 \ 1$ 时, 粒子重生, 即重新初始化粒子.

2 船尾航迹建模

由于船舶螺旋桨和海水填充的作用, 因而在船舶尾部会产生涡流及环流效果^[6], 即尾部航迹. 由于尾迹产生很复杂, 这里只分析其实际的形状和外观, 通过粒子系统来近似模拟. 根据舰船直航情形的合成孔径雷达照片和经验分析^[10], 船尾航迹的扩展宽度 $W(x)$ 不仅与船尾的距离 x 有关, 而且也与船长和船宽有关, 其具体关系可表示为^[10-11]

$$W(x) = x^{1/a} \left[\bar{\omega}_0 B^{(a-1)/a} \right] / \left[\left(\frac{\bar{x}_0 L}{B} \right)^{1/a} \right] \tag{17}$$

式中: L 为船长; B 为船宽. 取 $\bar{x}_0 \approx 4$, $\bar{\omega}_0 \approx 4$, a 根据经验取值 5, 则式(17)可简化为

$$W(x) = \frac{4B}{(4L)^{1/5}} x^{1/5} \tag{18}$$

确定了 x 和 $W(x)$ 的值之后, 根据三角公式可直接推出距离船尾 x 处尾迹的张角

$$\alpha = 2\arctan(W(x)/2x) \tag{19}$$

根据式(19), 可以限制粒子的活动范围. 粒子的透明度直接根据 x 作线性变化, 即越远越透明, 其变化速度用来控制粒子拖尾的长短.

尾部航迹粒子系统建模过程跟船首的类似, 只是其初始化位置应在船尾浪高处 $(0,0,H)$, 初始速度 v^b 为

$$\left. \begin{aligned} v_x^b &= -v_0 r_1 \\ v_y^b &= 0 \\ v_z^b &= r_1 v_x^b \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

式中: r_1 为 $(0,1)$ 间的随机数. 粒子发射后, 只受重

力加速度 g 的影响,其位置、生命值更新和船首类似,只是其位置的高度值要与浪高一致.最后,控制粒子消亡时,除了考虑当生命值小于 0.000 1 的条件外,还要考虑粒子位置超出式(17)所限制范围的条件.

3 基于 OSG 航迹实现及实验结果

本文整个海洋仿真系统基于 OSG 和 VS2005 来实现.下面根据第 2 节介绍的数学模型,详细介绍基于 OSG 粒子系统的三维舰船航迹具体实现和实验结果分析.

OSG 提供了一套高效封装的粒子系统^[12],粒子的生成采用布告板与色彩融合技术,渲染总体效果比较真实,其实现结构如图 3 所示.粒子系统属性对象负责管理粒子的生成、更新和渲染,需关联一个粒子模板来定义粒子的各种属性.一个标准的放射器对象包括计数器、放置器和发射器,它为粒子元素控制提供了一个标准机制,需要指定专门的粒子系统属性对象.编程器负责对单个粒子的运动进行特定的控制,如加入引力、阻力或者自定义力的影响.使用 OSG 粒子系统时,既可以直接调用标准模块,也可以调用按标准自定义的模块,这样可灵活应用它作粒子系统的二次开发.

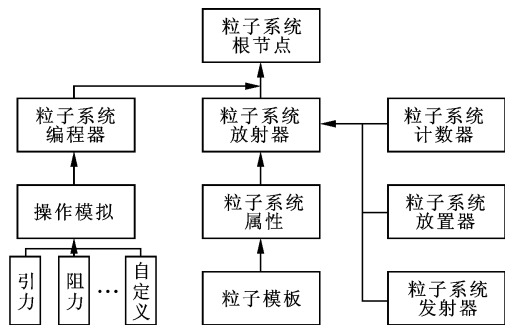


图 3 OSG 粒子系统结构图

3.1 基于 OSG 粒子系统的船首船行波实现

根据上述 OSG 粒子系统的介绍,船首船行波的实现步骤如下.

(1)新建粒子模板对象,并设置粒子生命值、大小、透明度变化范围等属性.新建粒子系统属性对象,并关联新建的粒子模板对象,设置浪花材质纹理,启用混合属性,关闭光照.

(2)新建标准粒子系统放射器对象,依次添加计数器、放置器、发射器对象.因为粒子初始位置和发射速度是相对于船首位置的,所以要把放射器对象放在舰船的变换节点下,以保证舰船运动时其相对

位置保持不变.其中,计数器控制每帧发射的粒子数,这里直接采用标准的随机计数器,使每帧发射数目控制在一个随机范围内.放置器控制粒子的发射位置,这里采用标准的点放置器,其初始位置设置为船首浪高处.发射器控制每个粒子的初始发射速度,这里需要自定义发射器:从标准发射器派生自定义的发射器类,然后重载发射函数,在该函数里根据式(13)定义粒子的初始发射速度.

(3)新建粒子系统编程器对象,根据式(14)设置粒子系统在生命周期内的运动控制,这里只需添加万有引力的操作模拟对象,即只有垂直方向的重力加速度影响发射后的粒子运动.

(4)给粒子系统根节点添加标准的粒子系统更新器对象,它会根据编程器对象设置的运动控制,按照式(15)自动更新粒子位置.根据粒子系统属性对象设置的参数,自动更新粒子的颜色、透明度等属性,并根据更新的生命值控制粒子消亡.

3.2 基于 OSG 粒子系统的船尾航迹实现

尾迹粒子系统实现过程与船首类似,只是粒子材质纹理和透明度变化范围不同.放置器初始位置设置为船尾浪高处,发射器使用标准的弧度发射器,其水平发射角则由式(19)计算的张角控制,垂直发射角可根据速度随机定义.

为了使尾迹粒子系统跟海面正常融合,避免海面覆盖生成的粒子,粒子更新和渲染时还要进行两步操作:①在更新粒子位置时,实时获得该位置的浪高,加上 0.01 m 的偏移值,并以此设置粒子的高度;②将海面和粒子放在不同的渲染队列,即把粒子系统的渲染顺序放到海面的后面,并开启深度排序、设置混合属性.

3.3 实验结果

实验系统的 PC 机硬件配置:CPU 为 Pentium Dual-core E5400/2.7 GHz;内存为 DDR II 800/2 GB;显卡为 NVIDIA GeForce 9600 GSO/512 MB 显存,硬盘为 160 GB/7200/16 MB.软件配置:操作系统为 WinXPSP3;OpenGL2.2;OSG2.8.2;VS2005 sp1.舰船航迹的渲染效果如图 4 所示.

通过向场景中添加状态事件处理器,实时记录绘制三角形数和帧速,记录结果如表 1 所示.

表 1 本文方法在不同绘制状态时的记录

绘制状态	绘制三角形数	帧速/帧·s ⁻¹
空海洋系统	65 000	59.25~59.98
加入 V 形船行波	75 000~86 000	58.52~59.61
加入船尾航迹	85 000~102 600	58.36~59.27

由表1记录可以看出,按照本文方法加入舰船航迹粒子系统后,对系统显示帧速的影响非常小(<1 帧/s),完全能满足海洋环境仿真系统实时性的需求,所绘制的面片数仅约为文献[7]的37%~69%,绘制效率更高。



图4 舰船航迹截图

4 总 结

本文将水面波的弥散物理特性应用到船首产生破浪的运动建模中,进而建立简化的船行波粒子系统模型。对船尾航迹,则忽略湍流等具体因素,通过分析其形状对尾部航迹建模,并采用后续渲染技术实现与海面的融合。基于OSG粒子系统和VS2005平台对本文方法进行具体实现,通过对航迹生成代码的封装,留下控制航迹的主要参数接口,使此航迹系统可根据需要自由设置,并可方便移植到各种三维海面仿真系统中。在水声对抗海洋仿真系统中的实际应用表明:本文的航迹可视化方法对整个系统帧速影响较小,有较好的实时性;和已有方法相比,该航迹系统更符合船行波的物理运动规律,并且易于实现,三维视觉效果有所提高。

参考文献:

- [1] TESSENDORF J. Interactive water surfaces [M]// KIRMSE A. Game Programming Gems 4. Hingham, MA, USA: Charles River Media, 2004: 265-274.
- [2] GOSS M E. A Real time particle system for display of ship wakes [J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1990, 272(7): 30-35.

- [3] 尹勇,任鸿翔,张秀凤,等. 航海仿真虚拟环境的海浪视景生成技术[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 313-315.
YIN Yong, REN Hongxiang, ZHANG Xiufeng, et al. Wave simulation technology applied to virtual environment of navigation simulation [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(3): 313-315.
- [4] 王鸿吉,张兴周,徐俊杰. 基于粒子系统和图像合成的船舶航迹流模拟研究与实现[J]. 应用科技, 2007, 34(1): 35-38.
WANG Hongji, ZHANG Xingzhou, XU Junjie. Study and realization on simulation of ship wakes based on particle system and image synthesis [J]. Applied Science and Technology, 2007, 34(1): 35-38.
- [5] 丁绍洁. 虚拟海洋环境生成及场景特效研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008: 60-65.
- [6] 赵欣,李凤霞,战守义. 基于粒子系统的舰船航迹仿真[J]. 计算机工程, 2008, 34(15): 22-24.
ZHAO Xin, LI Fengxia, ZHAN Shouyi. Ship wakes simulation based on particle systems [J]. Computer Engineering, 2008, 34(15): 22-24.
- [7] 胡一笑,姜昱明. 船行波的三维可视化仿真[J]. 计算机应用, 2008, 28(S1): 247-249.
HU Yixiao, JIANG Yuming. Simulation of 3D ship waves [J]. Computer Applications, 2008, 28(S1): 247-249.
- [8] 虞宏毅. 大规模水场景的实时绘制[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 19-22.
- [9] ROZMAN S. Wake pattern of a boat [D]. Ljubljana, Slovenia: University of Ljubljana, 2008: 3-10.
- [10] ZILMAN G, APOLSKI A, MAROM M. The speed and beam of a ship from its wake's SAR images [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(10): 2335-2343.
- [11] 王彦杰,汪增福. 复杂环境下的舰船航迹仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3247-3249.
WANG Yanjie, WANG Zengfu. Simulation of ship wake in complex environment [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11): 3247-3249.
- [12] 肖鹏,刘更代,徐明亮. OpenSceneGraph 三维渲染引擎编程指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 372-387.

(编辑 刘杨 武红江)