虚拟远海环境的建模与渲染技术

杨新颖 龚光红 张 波 黄展鹏

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 通过分波幅和分相位的扰动算法,改进了基于线性风浪谱的圆滑波峰现象;结合 SNE(Synthetic Natural Environment)的浪级、风级、浪高,以及平均周期等信息,实现了与环境结合的风浪可视化算法;综合心理声学和音乐声学等主观声音学科,提出了风浪波谱参数的修正方案,并实现了实时风浪噪音算法的均衡器特性参数与增益调参;采用基于流动纹理的过程着色方案;并将环境纹理镜像化后合并,然后进行景象的高斯模糊;着色后修饰环境图像噪声,提高了适用于海洋景象模拟的纹素质量;实现了基于 SNE 综合自然环境信息的实时远海视听一体化系统,验证了视听算法的有效性.

关 键 词: 虚拟海洋; 综合自然环境; 波谱因子; 声学修正; 流动纹理; 过程着色

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)04-0493-04

Virtual modeling and rendering technologies of high-seas environment

Yang Xinying Gong Guanghong Zhang Bo Huang Zhanpeng

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A real-time linear accumulation ocean wave spectrum algorithm was adjusted by disturbing weighted phasic and amplitude factors which meliorated the defective smooth figure of billows and stormy waves. Base on the synthetic natural environment (SNE) information such as stormy level, wind level, equalized wave amplitude, and average cycle, advanced real-time combining environmental influence algorithm was presented. Based on the psychoacoustics and musical acoustics, advanced storm wave parameter adjusting method was proposed, and then real-time sound implementation node was realized using audio equalizer. Runtime shading method for flowing texture was proposed, background texture was appended to original one after mirror-image generation and Gauss blur distortion. Texture graphical quality was modified and image noise was also reduced after this underline processing. A harmonic visual and audio virtual system combing SNE information was realized which testified the feasibility of the advanced storm wave spectrum.

Key words: virtual ocean; synthetic natural environment; spectrum parameter; acoustical adjusting; flowing texture; procedural shading

海浪是个十分复杂的自然现象,不同的原因将导致各种不同的海浪. 风浪是海上发生频率最多、影响最大的海洋现象. 远海的风浪模型通常以风为原动力,重力为恢复力,并且不考虑近海特殊光照现象以及深海海底地形的影响.

目前比较流行的主要有流体力学方法、基于海浪谱的方法、几何造型法,以及分形几何学方法等. 流体力学法运用 N-S 方程完整描述满足粘性流体特性的海浪运动[1-3],但生成海面场景需要耗费大量时间,不能满足实时性要求. 基于 Pierson-Moskowitz 谱和 Hesselmann 谱的海浪谱海洋仿真方法虽然脱离了流体力学的物理模型[3],

收稿日期: 2008-04-33

基金项目: 装备预研重点基金资助项目(9140A04040106HT0801)

作者简介: 杨新颖(1981—),男,河北秦皇岛人,博士生,XYYang@cn.ibm.com.

但在提高被过滤白噪声分辨率时，会导致计算量增大、实时性变差等问题. 线性叠加方法是目前国内外使用最多的海浪视景仿真方法，其基本思想基于 Honguet-Higgins 的模型[4]，但这种方法生成的海浪波峰比较圆滑，海浪逼真性较差. 上述各种波谱模型很少具有与环境信息 SNE(Synthetic Natural Environment)结合的虚拟海洋模型[5]，特别是实时风浪噪声模型. 本文通过分波幅和分相位的扰动算法，结合 SNE 相关信息，改进了基于线性风浪谱的圆滑波峰现象；综合心理声学和音乐声学等主观声音学科，提出了风浪波谱参数的修正方案，并实现了实时风浪噪音算法的均衡器特性参数与增益调参；采用流动纹理进行过程着色，将环境纹理镜像化与高斯模糊；最终实现了基于自然环境信息的实时远海视听虚拟系统.

1 远海波谱模型

线性叠加法将平稳海况下的海浪视为平稳的具有各态历经性的随机过程，并将风浪波动视为无限个振幅、频率和初相位不等，并且在水平面上与轴线沿不同方向传播的简单余弦波叠加而成. 由于海浪能量频带较窄，高频和低频的能量都很小，设其分别占总能量的3%，计算时可以不考虑这些组成波的影响.

1.1 海水波纹的基础数学模型

在实际工程应用中为了使所选的频率更具有代表性以减少所要选的组成波的数目，通常采用等频间隔或者等能量间隔的方法对频率进行分割，进而求得方向分布函数和波振幅；根据深水波浪的频散关系可以确定海面高度场. 风浪高度算法见式(1)，其中 XOZ 面为假定海平面，浪高模型为与 x 轴成不同角度 θ 方向传播的简单余弦波叠加而成.

$$\zeta = H_S + \sum_{i=1}^{n} \zeta_i \cos[k_i(x\sin\theta + z\cos\theta) + \omega_i t + \varphi_i] \tag{1}$$

式中，ζ 为瞬间波浪高度；H_S 为海平面上的平均高度；ζ_i 为第 i 个分量波浪高度；k_i 和 ω_i 分别表示第 i 个分量的深水传播系数和分量角频率，$k_i = \omega_i^2/g$，g 为重力加速度，$g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$；φ_i 为构成第 i 个相位角；n 为简谐波个数，本文取 $n=9$. 由式(1)解算出某个时刻波浪的高度，在一定区域内的海平面会在波峰与波谷间连续变化，可以初步实现海水波浪的动态变化，但生成的海浪波峰较圆滑，用其生成海浪逼真性较差.

1.2 改进的波纹叠加模型

按照式(1)给出的数学模型具有明显的线性痕迹，尤其是波浪形态比较规则，真实感较差. 为了增强风浪波纹的随机效果，使用扰动算法生成的 $\Delta\zeta$ 和 $\Delta\varphi$ 对分波幅和分相位进行扰动.

$$\left.\begin{aligned} \Delta\zeta_S &= \sum_{i=1}^{n} \Delta\zeta\zeta_i \cos[\chi(x,z,t) + \Delta\varphi\varphi_i] \\ \chi(x,z,t) &= k_i(x\sin\theta + z\cos\theta) + \omega_i t \\ \Delta\zeta &= 1 + R(-c_1, c_1)/C_1 \\ \Delta\varphi &= 1 + R(-c_2, c_2)/C_2 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中，分波幅 $\Delta\zeta$ 和分相位 $\Delta\varphi$ 为随机变量；$\chi(x,z,t)$ 为海面高度波性叠加法随时间 t 的角度函数；R 为随机函数，值域为 $[-c_i, c_i]$；c_1 和 c_2 分别为分波幅和分相位的随机域整数；C_i 为 $R(-c_i, c_i)$ 向区间 $[-1.0, 1.0]$ 映射的常量. $\Delta\zeta$ 和 $\Delta\varphi$ 的随机特性作用于海平面上的所有点 (x_S, z_S)，因此，海面的规则性被破坏，效果得到明显改善，如图 1 所示.



a Higgins 模型海浪效果　　b 改进的 Higgins 海浪波纹效果

图 1 $\Delta\zeta$ 及 $\Delta\varphi$ 扰动前后远海效果图

图 1a 为基础波纹模型的海浪效果，图 1b 的实现加入了 $\Delta\zeta$ 及 $\Delta\varphi$ 扰动算法. 对于扰动算法中常量的选取，经反复实验得出：当 $\Delta\zeta \in [0.75, 1.25]$，$\Delta\varphi \in [0.65, 1.35]$ 时，风浪尖锋的效果相对最佳.

2 SNE 远海虚拟视听模型

目前主流的各种风浪波谱模型很少具有与环境信息 SNE 结合的虚拟海洋可视化模型，特别是结合 SNE 的实时风浪噪声视听一体化模型；因此本文对基于 SNE 的远海视听算法进行研究.

2.1 结合 SNE 信息的风浪波纹

在虚拟海洋环境建模中考虑的海洋波浪参数主要有：波高、波长、平均周期、频率、波速、初始相位等. 根据国家海洋局浪级的划分，浪级、风级以及浪高、平均周期间的对应关系[6]，总结和筛选出具有真实物理意义的 SNE 海洋信息(见表 1).

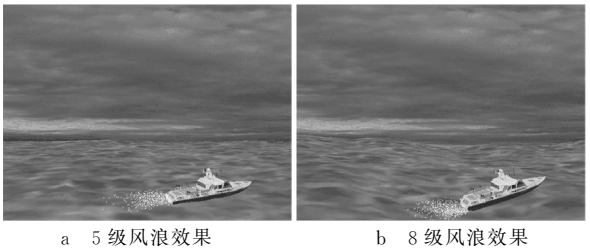
表 1 中列出了部分蒲氏风级下的浪高划分、波浪平均周期，以及 9 层简谐波中的分角频(对应

分振幅数据 ζ 省略).实时风浪等级与蒲氏风级有相应的映射关系,并且在结合 SNE 信息的动态海洋风浪平均波高参数 H_S 往往取值于海洋机构对浪高级划分的上限高度.将表 1 中的 SNE 海洋环境信息数据带入式(2)中,可以得到不同风浪级状态下的瞬时浪高,从而可以采用第 3 节的渲染方法得到动态海洋波纹视景图像(见图 2).

图 1b 中改进的海洋波谱模型为 4 级风浪;图 2a 和图 2b 对应 5 级风浪和 8 级风浪的效果图.它们分别对应蒲氏风浪的 7 级和 10 级.

表 1　海洋局划分 SNE 远海环境信息数据表

蒲氏风级	海洋局浪高划分/m	实时浪高/m	浪平均周期/s	ω_i/rad								
				ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9
2～3	0.1～0.5	0.6	3.0	1.050	1.137	1.313	1.400	0.605	2.015	2.425	2.835	3.245
4	0.5～1.25	1.3	5.2	0.710	0.753	0.838	0.880	0.982	1.186	1.390	1.594	1.798
5	1.25～2.5	2.7	5.9	0.420	0.470	0.570	0.620	0.757	1.031	1.305	1.579	1.853
6～7	2.5～4.0	4.2	6.4	0.300	0.348	0.443	0.490	0.643	0.949	1.255	1.561	1.867
8	4.0～6.0	5.9	6.6	0.230	0.273	0.358	0.400	0.564	0.982	1.220	1.548	1.876
9～10	6.0～9.0	8.4	6.9	0.180	0.218	0.293	0.330	0.502	0.846	1.190	1.534	1.878



a　5 级风浪效果　　b　8 级风浪效果

图 2　不同风浪级的远海效果图

2.2　随浪级变化的动态风浪噪音仿真

结合综合自然环境的动态数字声音建模属于交互式虚拟现实领域的前沿问题;本文论述的随 SNE 信息变化的动态风浪噪音建模方法基于基频状态下的高清晰度原始干声模型,并利用心理声学和音乐声学将动态频谱算法进行理论和工程实现.

设与表 1 对应的分量振幅为 ζ_{li},l 表示与蒲氏浪级对应的仿真风浪级;设风浪噪音等效频谱函数为 $L(\bar{\omega})$,$\bar{\omega}$ 为分量角频率对应的声音频谱共振峰;各分频声压级频谱特性为 $L_{li}(\bar{\omega}_i)$;基频状态振幅和声压级分别为 ζ_0 和 $L(\bar{\omega}_0)$,可以得出

$$L_{li}(\bar{\omega}_i)=L(\bar{\omega}_0)+20\lg(\zeta_{li}/\zeta_0) \tag{3}$$

文献[7]提出了基于心理声学的 5 段等响曲线函数,通过此函数可以计算 n 级谐波音源的联合声压级,可以完成声压级到心理学响度的传递映射.设 $G(\bar{\omega}/2\pi)$ 为等响曲线映射函数,于是得到

$$L(\bar{\omega})=10\lg\left(\sum_{i=1}^{n}10^{L_{li}(\bar{\omega}_i)/10}\right)G(\bar{\omega}_i/2\pi) \tag{4}$$

得到某仿真风浪级的等效声压级 $L(\bar{\omega})$ 后,可以通过实时提升均衡器或其它配套效果器增益的方法对声音响度进行仿真.为了仿真噪音谐波频率随浪级变化的现象,可以通过参数均衡器的主要频段调参方式来实现[7].

1) 根据 l 仿真浪级对应的平均周期,得到平均频率 ω;设海浪谱频谱的基频特性到海浪声的声音频谱特性共振峰 $\bar{\omega}$ 的对应函数为 $\bar{\omega}=f(\omega)$,此函数体现的非线性特性由神经网络进行解算[7](海浪频谱共振峰为输入节点,对应的声音频响共振峰为网络输出);从而确定浪级主调频段的中心频率 $\bar{\omega}=f(\bar{\omega}_0)$,调增益 $\Delta L=L(\bar{\omega})-L(\bar{\omega}_0)$.

2) 确定欲调谐波个数 m,并对浪级 l 下的各次机械谐波与近次浪级 l',计算不同次谐波的同位分量振幅变化值 $\Delta\zeta=\zeta_{li}-\zeta_{l'i}$.

3) 由大到小取 m 组 $|\Delta\zeta|$,并确定待调频段的中心频率 $f(\omega_{ll'})=f(\omega_0)\cdot(\bar{\omega}_{li}+\bar{\omega}_{l'i})/2\bar{\omega}_0$,分量增益参数调整幅度可根据式(3)推导.

4) 将推导出的分量幅值 $\Delta\zeta$ 与推导出的角频率 $f(\omega_{ll'})$,实现风浪声音的实时调参[7];并利用心理声学的声音幅频参数对表 1 的分量 ω_i 及 ζ 进行平均值修正,实现视听一体化的实时风浪多感官虚拟显示.

3　SNE 远海实时虚拟场景渲染

在研究结合 SNE 环境信息的虚拟海洋风浪视听模型算法的基础上,对远海景观进行可视化渲染,从而完成虚拟远海系统的工程实现.

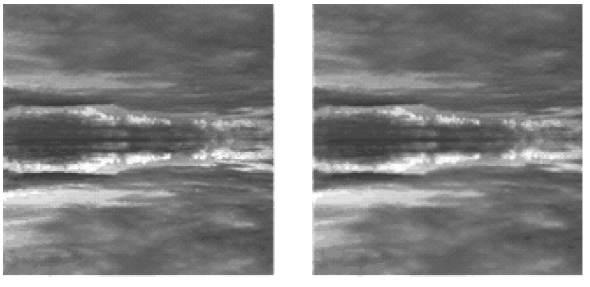
与近海海岸及卷浪的侧重于场景光照及凹凸纹理的建模技术不同,远海可视化渲染主要侧重于与 SNE 环境结合的不同浪级的风浪效果.远海海面渲染的主要内容是结合 SNE 能见度、雾化度,以及自然环境时间而产生的远海海面倒影.文中采用流动海洋纹理以及天穹纹理的过程着色方案实现风浪可视化场景的逼真渲染,具体步骤如下:

1) 将边缘优化的海洋纹理图片进行切割,形成若干与海面相对应的三角形贴到相应的位置

上;利用帧间分割纹理图片实现纹理的流动效果.

2) 将高清晰度背景纹理按照图3的过程进行修饰加工.首先,将$2^n \times 2^{n-1}$像素的天穹图片进行镜像化处理,并与基础图元进行拼接;然后,可以根据具体融合因子选取方案进行亮度和对比度预处理(如图3a);最后,将镜像图层进行半径系数为α的高斯模糊处理(图3b),以模拟水面镜像景物的模糊特征.

3) 结合表1中关于各风浪级的ω_i与ζ的SNE信息;再根据动态可视化波纹及改进的扰动算法,实现动态的海洋风浪波纹.



a 纹理镜像化后效果 b 纹理加工后效果

图3 特殊纹理的镜像、着色与高斯模糊加工

在混合过程中,假设源和目标混合因子对应的4维向量为$\boldsymbol{S}$和$\boldsymbol{D}$,片元和帧缓存的像素对应的4维颜色向量为$\boldsymbol{C}_S$和$\boldsymbol{C}_D$,混合后片元颜色为$\boldsymbol{S}\cdot\boldsymbol{C}_S+\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{C}_D$.令$\boldsymbol{S}=1$,$\boldsymbol{D}=(C_{s4},C_{s4},C_{s4},C_{s4})$,$C_{s4}$为融合因子的标量值;并对场景进行渲染.图4为流动海洋纹理与经过镜像、修色与高斯模糊后的天穹纹理融合效果图.

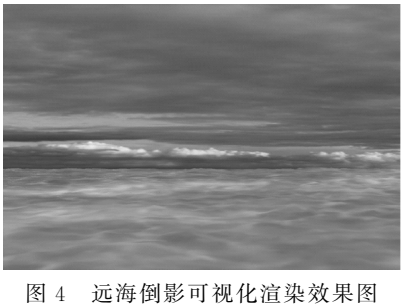


图4 远海倒影可视化渲染效果图

4 结束语

通过分波幅和分相位的扰动算法,并结合SNE相关信息,改进了基于线性风浪谱的圆滑波峰现象;综合心理声学和音乐声学等主观声音学科,提出了风浪波谱参数的修正方案,并实现了实时风浪噪音算法的均衡器特性参数与增益调参;将流动纹理进行过程着色及高斯模糊修饰,提高了海洋景象模拟的纹素质量;实现了基于SNE信息的实时远海视听一体化系统.

参考文献(References)

[1] Jens K, Peter K. A particle system for interactive visualization of 3D flows [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(6): 744-756

[2] Chen J X. Real time fluid simulation in a dynamic virtual environment[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1997:52-61

[3] Reeves W T, Blau R. Approximate and probabilistic algorithms for shading and rending structured particle system [J]. Transactions of SIGGRAPH85 Computer Graphics, 1985, 19(3):313-322

[4] Multigen Inc. Multigen-Paradigm vega prime guide(version 2.0)[P]. USA: Multigen-Paradigm Inc, 2005

[5] 张红亮. 远海海面环境可视化建模与仿真[D].北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2007:14-19
Zhang Hongliang. Modeling and simulation of environment of virtual ocean far from coast [D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007:14-19 (in Chinese)

[6] 尹勇.分布式航海仿真系统中视景实时生成算法的研究[D].大连:大连海事大学信息工程与控制学院, 2001
Yin Yong. Research on real-time algorithm of viewing scene in distributed navigational simulation system [D]. Dalian: School of Transportation Information Engineering and Controls, Dalian Maritime University, 2001 (in Chinese)

[7] Yang Xinying, Gong Guanghong. Real-time digital sound spectrum and RT time estimation[C]//IEEE Chinese Control and Decision-making Conference. Yantai: IEEE, 2008: 1481-1485

[8] 杨新颖,龚光红,王行仁.夜间海上飞行的实时仿真[J].北京航空航天大学学报, 2008, 34(1):35-38
Yang Xinying, Gong Guanghong, Wang Xingren. Real-time visual system of night-flying across the sea [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008,34(1):35-38(in Chinese)

[9] Bruckschen R, Kuester F. Real-time out-of-core visualization of particle traces [J]. IEEE Parallel and Large-Data Visualization and Graphics, 2001: 45-50

[10] Yang Xinying, Gong Guanghong, Tian Yuan. Optimal game theory in complicated virtual-modeling and CGF decision-making with multi-granularities[C]//IEEE International Conference on Smart Manufacturing Application Conference. Yantai: IEEE, 2008: 95-99

(责任编辑:赵海容)