

基于几何建模的海浪模拟

王相海^{1,2} 李婷婷¹

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116029)¹

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)²

摘 要 提出一种基于几何的快速海浪建模方法,即将人眼对海浪的观察感知结合到对海平面网格的区域划分中,对人眼不敏感区域进行网格粗划分,而对人眼敏感区域进行网格细划分,进一步对不同区域采用不同的数学函数或不同的参数控制来模拟海浪的涌动,同时通过设置相应的随机过程来增加敏感区域海浪的细节运动模拟。所提出的方法具有实现简单、计算消耗小、算法易于实现等优点,可满足游戏、动画等应用场景对海浪背景的实时性要求。仿真试验结果验证了模型的有效性。

关键词 海浪模拟,几何建模,人眼感知,网格

中图法分类号 TP391 **文献标识码** A

Wave Simulation Based on Geometric Modeling

WANG Xiang-hai^{1,2} LI Ting-ting¹

(College of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)¹

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)²

Abstract This paper presented a fast wave simulation based on geometric modeling method, this method makes the human eye perception of the waves integrated into the subdivision of the sea grid, for the human eye no-sensitive region uses coarse grid, the human eye sensitive region uses fine mesh grid, further different regions use different mathematical functions or different parameters to simulate ocean waves control, at the same time by setting the corresponding random process to increase the sensitive areas of the details on wave motion simulation. The proposed method is simple, calculation of consumption is small, algorithm is easy to implement, can meet the games, animation and other scenarios in the context of real-time requirements of the waves. Simulation results verify the validity of the model.

Keywords Ocean wave simulation, Geometric modeling, Perception of the human eye, Grid

1 引言

模拟自然界中的烟、水、云等流体一直是计算机图形学领域中具有挑战性的一个研究课题。海浪模拟作为水流体模拟的一个分支,因其所具有的波动性、广阔性和受力复杂性等性质而成为水流体模拟中的难点问题^[1]。而实际应用,诸如动画背景、三维游戏和模拟训练等,对海浪模拟的需求十分广泛。目前,对海浪的模拟主要有 3 种方法。第一种是基于物理的方法,即从海浪的物理特性出发通过计算力学 N-S 方程,获得流体质点在各个时间的运动状态。如徐迎庆等从水力学方程出发提出了一个基于物理模型的模拟小溪流水的方法^[2];Kass 等通过简化 N-S 方程实现了水波的快速模拟算法^[3];Foster 等人根据流体所受物理环境的影响通过求解初始和边界条件下的 N-S 方程获得海浪的模拟模型^[4]。该方法计算精细、模拟效果细腻、真实感强,但计算量大,不能达到实时要求,且一般只能合成海浪形态变化不大的场景,如平

静的海面 and 流水等,对变化幅度较大的海浪场景很难有逼真的效果。第二种是基于统计模型的方法,即利用海洋统计和经验模型合成不同正弦波,来获得海面仿真的效果,如杨怀平等在文献^[5]中提出了一种基于海浪谱的波浪模拟方法;Premoze 等也提出了一种结合物理模型与统计数据自然海面模拟方法^[6]。该类方法所涉及到的数据模型十分复杂,计算量大,实时性较差。第三种是基于几何的方法,即通过构造一定的数学函数来模拟水波的外形,合成一个近似真实的海洋表面,如 Peachey 等利用正弦函数和二次函数的线性组合计算出高度场以表示海面^[7];Fournier 等采用参数曲面表示水面解决了波峰卷曲的波浪造型问题^[8];Mitchell 也在文献^[9]中提出一种基于高度场的连续帧海面动画模拟方法。该方法依赖数学表示来构建海浪的基本结构,方法简单,通常可以采用较少的波浪序列就可以近似实时地模拟海浪。然而,传统的几何模拟方法通常对海浪细节的模拟较为粗糙,逼真度不是很好。

到稿日期:2010-11-07 返修日期:2011-03-02 本文受辽宁省自然科学基金项目(20102123),辽宁百千万人才工程项目(2008921036),南京邮电学院图像处理与图像通信江苏省重点实验室开放基金(ZK207008)资助。

王相海 男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机图形学、多媒体信息处理等,E-mail: xhwang@lnnu.edu.cn;李婷婷女,硕士生,主要研究领域为计算机图形学、计算机动画技术。

本文首先分析海浪波动的视觉感知情况,进而提出一种基于几何建模的海浪模拟方法。方法首先利用人眼的视觉特性对海平面网格进行区域划分,对人眼不敏感区域进行网格粗划分,对人眼敏感区域则进行网格细划分。在此基础上,针对不同区域通过采用不同的数学函数或不同的参数控制来模拟海浪的涌动,同时进一步通过设置相应的随机过程来增加敏感区域海浪的细节运动情况模拟。实验结果表明,本文所提出的方法结构简单、模拟效果好,特别考虑了人眼对海平面区域的敏感程度,可控制对海浪运动的细节模拟,克服了传统几何建模过程对海浪运动模拟的单一性,取得了很好的视觉效果。

2 海浪波动的视觉感知分析

海浪波动既具有一定的规律性,又具有一定的随机性。人眼视觉系统(HVS)作为一个特殊的光学成像系统,在观察场景时对不同区域的敏感程度是有差别的,即人眼的视角是有限的。一般映在人眼视网膜上的图像,通常只有中心约 15° 的部分能分辨清楚,该区域也称为分辨视域;从 15° 到 30° 之间的区域则称为有效视域,在该区域能看清物体的存在和具有什么动作,但分辨能力已经下降;而超过水平方向视野角 30° 的周边部分被称为诱导视野,在该区域通常只能感觉到物体的存在或有动作出现,并不能看清楚是什么物体或什么动作。这样,人眼在观察海面的海浪时,对距离人眼较近的区域看到海浪的细节较多,而随着距离的增加,人眼看到海面波浪运动的细节在逐渐变少。根据人眼观测海面的这一视觉特性,本文在对海面建模的网格划分中,对距离人眼近的区域,采用较细的网格,以便模拟出海浪的细节信息;而距离观察点较远的区域,则采用较粗的网格划分,以节省计算量。此外,考虑到实际海浪的波动是在保持总体运动的趋势下通常伴随着一定的不规则性,从而在对海浪进行总体几何建模后,对局部区域通过调整相应的控制参数和增加随机过程来对海浪的细节进行模拟。

3 基于几何的海浪建模

3.1 海平面的网格化

采用四边形网格对海平面进行建模。传统的方法大都采用规则的海面网格区域,即将海面的可见区域划分成等距离的网格。此时,为了保证较好的细节模拟效果,通常需要加大网格的细度,从而给绘制阶段带来大量的计算量。本文根据人眼视觉特性采用了非均匀的网格划分方案,即在X轴方向上,采用海面中间细而两边松散的网格布局方法;在Y轴方向上,采用随着海平面远离视点网格密度逐渐扩大的网格布局法如图1所示。

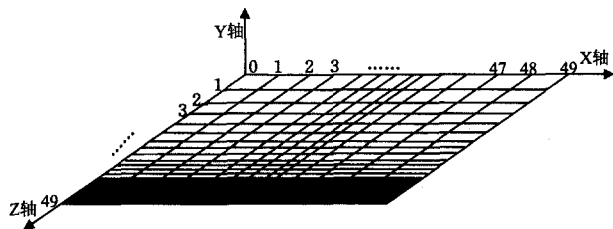


图1 海平面的网格分布示意图

3.2 海浪涌动的总体建模

在对海平面进行网格化建模后,为了模拟海浪的涌动过

程,需要根据海浪的运动原理实时改变网格中每个点的坐标值。平稳的海浪涌动呈现出一定的波动周期性,我们用正弦函数予以建模。而具有一定积累和推动的起伏海浪,则表现为整体具有波动周期性的同时其浪高的幅值是逐渐增加的,此时本文采用指数予以建模。图2给出了正弦函数示意图,其表现形式为 $Y=A \sin(\omega x + \varphi)$,其中 ω 用来确定海浪的波动周期, A 用来确定海浪的幅值,而 φ 则用来确定在不同网格点上海浪的“错位”情况。图3给出了指数函数示意图,其表现形式为 $Y=a^x (a>0, a \neq 1)$, a 用来控制海浪的起伏程度。



图2 平稳海浪的正弦函数模型

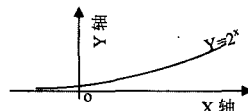


图3 起伏海浪的指数函数模型

3.3 海浪的运动模拟

海面上海浪的波动通过实时 y 值的变化来模拟。 y 值的变化是利用不同的分段函数获得的。依据人眼视觉特性对海平面网格进行区域划分。假设海面网格的Z轴上共有50条平行线(简称Z线,下同),将海平面网格按照Z线分成如下3个区域,如图4所示。区域1,第0~9条Z线所在区域;区域2,第10~29条Z线所在区域;区域3,第30~49条Z线所在区域。

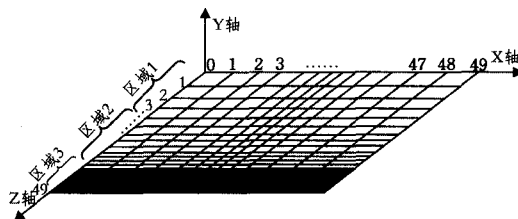


图4 海平面网的分区

对于每个区域,针对相应的模拟函数按如下方式获得每条Z线上网格点的实时 y 值。

(1) 正弦函数建模情况

区域1: $a \sin(40x \times \text{rand}() \times \alpha)$

区域2: $b \sin(40x \times \text{rand}() \times \alpha)$

区域3: $c \sin(40x \times \text{rand}() \times \alpha)$

其中, a, b, c 分别为海浪的幅值因子; α 为随机因子,实际应用时可根据情况设置。

(2) 指数函数建模情况

区域1: $a^{\alpha \times \sin(40x)}$

区域2: $b^{\beta \times \sin(40x)}$

区域3: $c^{\gamma \times \sin(40x)}$

其中, a, b, c 分别为海浪起伏程度因子; α, β, γ 为海浪的跳跃强度因子。

3.4 海浪速度控制

海浪在运动过程中速度并不是一成不变的,为了更好地模拟海浪的运动过程,可以考虑将海平面网格划分成不同的区域,不同的区域在重画过程中设置不同的刷新频率。图5

给出将 X 轴上的平行线(简称为 X 线)划分为两个区域(第 0~24 条 X 线划分为第一区,第 25~29 条 X 线划分为第二区)的示意图。第一区网格点对应纹理的刷新速度,由 wigglecount1 来控制(比如每 4 帧重画一次);第二区网格点对应纹理的刷新速度,由 wigglecount2 来控制(比如每 8 帧重画一次)。通过对不同区域施以不同的刷新速度,可从视觉上实现海浪运动速度的快慢变化。

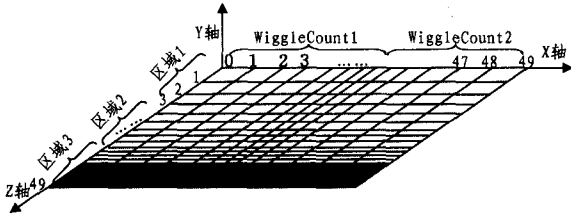


图 5 海平面网格的分区刷新速度控制

3.5 随机海浪的产生

按照前面基于固定海平面网格所模拟的海浪,尽管实时生成的海浪的幅值是变化的,但这些幅值所对应的位置是固定的,会使生成的海浪有些“僵硬”。为此,在实时产生幅值之前,可以考虑对海平面网格结点的位置进行小幅度的随机调整,即在建立好的海平面网格的基础上,对全部或部分网格点的位置,沿着海平面法向方向进行小幅度的随机扰动,生成具有随机特性的立体网格,以便进一步模拟海浪在保持整体运行趋势下的随机属性。

4 海浪的绘制

在海浪几何造型的基础上,本文采用纹理映射的方法来渲染海面,同时采用色彩融合来模拟海浪的半透明效果^[9,10]。

(1) 纹理映射

纹理映射是把存储在内存里的位图包裹到所生成的海平面网格上,实现纹理贴图。在映射过程中,首先对纹理图像进行分块,然后将每块小纹理图像对应实时地映射到海平面网格的每个四边形小网格上。具体过程包括:

① 定义纹理

```
void glTexImage2D(GLenum target, GLint level, GLint components, GLsizei width, GLsizei height, GLint border, GLenum format, GLenum type, const GLvoid * pixels)
```

其中,参数 target 为常数 GL_TEXTURE_2D; level 表示多级分辨率的纹理图像级数; components 为 1 到 4 的整数,表示选择 R、G、B、A 中的哪些分量用于调整和混合; width 和 height 给出了纹理图像的长度和宽度; border 为纹理边界宽度,它通常为 0; format 和 type 描述了纹理映射的格式和数据类型; pixels 描述纹理图像本身和它的边界。

② 选择纹理模式

```
void glTexParameter{if}[v](GLenum target, GLenum pname, TYPE param)
```

其中,参数 target 可以是 GL_TEXTURE_1D 或 GL_TEXTURE_2D,表示为一维或二维纹理,后两个参数控制纹理映射滤波、重复与简约等效果。

③ 纹理过滤

```
glTexParameter*(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_NEAREST);
```

```
glTexParameter*(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE
```

```
_MIN_FILTER, GL_NEAREST)
```

其中, GL_TEXTURE_2D 表示所用的纹理是二维的,后面参数定义滤波方式是放大还是缩小。

④ 纹理坐标

```
void glTexCoord{1234}[sifd][v](TYPE coords)
```

其中,参数{1234}代表纹理坐标的形式,{sifd}代表坐标参数类型,TYPE coords 用于设定纹理坐标。

(2) 色彩融合

本文采用色彩融合技术来模拟海水的半透明视觉效果,即通过 glColor 和颜色缓冲区中的目标颜色将混色函数应用于源颜色设置,产生水的透明效果。

在 OpenGL 中调用 glEnable(GL_BLEND) 启动融合操作;调用 glBlendFunc(GLenum sfactor, GLenum dfactor) 去查表完成混色的参数设置;通过在 glColor4f(r, g, b, a) 中设定 alpha 值,完成混色操作。

5 实验结果

为了验证本文海浪几何模型的有效性,进行了大量仿真试验。仿真试验在配置为 Pentium(R) 4 CPU 2.66GHz、DDR256M 内存及 Geforce 5200(64M) 显卡的 PC 机上,通过调用 OpenGL 函数库实现。实验结果如图 6、图 7 所示。图 7 中采用正弦函数建模(参见 3.3 节),相应参数因子 a, b, c 分别选取 2.5, 4 和 5, α 选为 4×10^{-6} ; 采用指数函数建模,相应参数因子 a, b, c 分别选取 1.08, 1.06, 1.08, α, β, γ 为 5.5, 4.0 和 3.5。

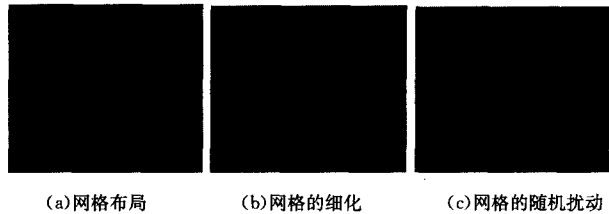


图 6 海平面网格的形态

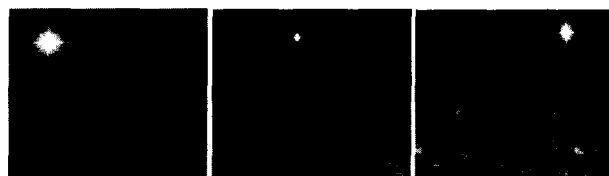


图 7 海浪的模拟效果

结束语 海浪具有丰富的细节特征和动态变化的特性。由于海浪的自身不规则特性,如何用最少的时空开销去刻画足够的细节,就成了模拟海浪的主要任务。本文提出一种基于人眼视觉特性的海浪几何建模方法,该方法具有实现简单、计算消耗小、易于实现等优点。同时考虑了人眼观察海浪时的感知特性,使海浪细节的模拟能有针对性,可满足游戏、动画等应用场景中对海浪背景的实时性要求,取得了很好的模拟效果。

参考文献

- [1] 皮学贤,杨旭东,李思昆,等. 近岸水域的波浪与水面仿真[J]. 计算机学报, 2007, 30(2): 324-329
- [2] 徐迎庆,苏成,李华,等. 基于物理模型的流水及波浪模拟[J]. 计

[3] Kass M, Miller G. Rapid, stable Fluid dynamics for computer graphics[J]. Computer Graphics, 1990, 24(4): 49-57
 [4] Foster N, Metaxas D. Modeling water for computer animation [J]. Commun ACM, 2000, 43 (7): 60- 67
 [5] 杨怀平, 孙家广. 基于海浪谱的波浪模拟[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(9): 1175-1178
 [6] Simon P, Michael A. Rendering Natural Waters [C]// Proceedings of the Pacific Graphics, Hong Kong, China, 2000: 23-30

[7] Peachey D. Modeling waves and surf [J]. Computer Graphics, 1986, 20(4): 65-74
 [8] Fournier A, Reeves W T. A simple model of ocean waves[J]. Computer Graphics, 1986, 20(4): 75-84
 [9] 唐荣锡, 汪嘉业, 彭群生, 等. 计算机图形学教程[M]北京: 科学出版社, 1990
 [10] Angel E. OpenGL 程序设计指南[M]. 李桂琼, 张文祥, 译. 北京: 清华大学出版社

(上接第 239 页)

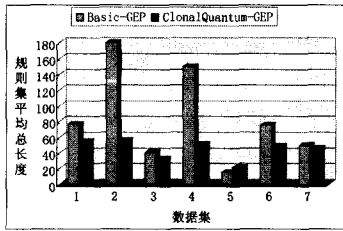


图 4 规则集平均总长度比较

分析(1)、(2)的结果: 本文在保留 GEP 编码优点的基础上, 为改进其遗传操作机制繁琐、费时和易陷入局部最优的缺点, 融入了克隆选择和量子进化原理。克隆选择的重点在于选择与克隆, 并通过记忆池保持最优解, 使其较一般遗传算法具有更好的多样性和更高的收敛效率。量子进化用量子位编码表示染色体, 用量子旋转和量子变异完成进化搜索, 具有“勘探”和“开采”的能力, 收敛速度快, 全局寻优能力强。结合克隆选择和量子进化的优点, ClonalQuantum-GEP 只需要更小的种群规模和更少的进化代数, 就可以搜索到比较理想的解, 分类效率显著提升(规则集平均总长度和分类时间均显著减少)。

(3) 规则集的一个例子

下面列出的是由 ClonalQuantum-GEP 产生的一个规则集, 来自于 Iris 数据集, 并获得了 100% 的最好分类精度。此规则集如下:

- 规则 1 IF $\left\{ \left(\frac{2 - attr3}{2} \right) > 0 \right\} > 0$ THEN class = Iris-setosa
- 规则 2 IF $\left\{ attr4 - \sqrt{attr2} \right\} > 0$ THEN class = Iris-virginica
- 规则 3 IF $\left\{ attr3 - 5 \right\} > 0$ THEN class = Iris-virginica
- 规则 4 IF $\left\{ (1 > 0? attr2; 7) * \left(\frac{attr1}{2 - attr3 + attr2} \right) - \frac{5}{1} \right\} > 0$ THEN class = Iris-versicolor
- 规则 5 IF $\left\{ \left(\frac{attr4 - 1 - 1}{5 - attr4 - attr3} \right) * 2 \right\} > 0$ THEN class = Iris-versicolor

上述表达式中的 attr1 - attr4 分别表示 Iris 数据集的 sepal length, sepal width, petal length, petal width 4 个属性。

结束语 本文在文献[6]的分类策略基础上, 融合克隆选择和量子进化原理, 提出了 ClonalQuantum-GEP 分类算法。此算法充分结合了克隆选择和量子进化的优点, 通过量子种群的更新和探测影响抗体种群的搜索方向和进化能力, 并通

过记忆池保持最优解, 使其具有更丰富的种群多样性、更强的全局寻优能力和更快的收敛速度。在几个数据集上的实验证明, 此算法能以较小的种群规模和较少的进化代数获得较理想的分类效果。同文献[6]相比, 分类的平均精度基本接近, 最好精度有一定的提高, 而分类效率显著提升。

从实验结果来看, 测试的最好精度普遍有一定程度的提高, 但在平均精度上虽接近却不显优势, 这可能和各种参数的设置有关, 如克隆系数、量子变异处理概率等, 可以通过进一步的灵敏度分析来调优, 以期实验效果有更大的改善。

参 考 文 献

[1] Ferreira C. Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence (2nd Edition) [M]. Germany: Springer-Verlag, 2006
 [2] 焦李成, 杜海峰, 刘芳, 等. 免疫优化计算、学习与识别[M]. 北京: 科学出版社, 2006
 [3] 李士勇, 李盼池. 量子计算与量子优化算法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2009
 [4] Narayanan A, Moore M. Quantum-inspired genetic algorithms [C]//IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Nagoya, Japan, 1996: 61-66
 [5] 解平, 李斌, 庄镇泉. 一种新的混合量子进化算法[J]. 计算机科学, 2008, 35(2): 166-170
 [6] Zhou C, Xiao W, Tirpak T M, et al. Evolving Accurate and Compact Classification Rules with Gene Expression Programming [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7 (6): 519-531
 [7] Karakasis V K, Stafylopatis A. Efficient Evolution of Accurate Classification Rules Using a Combination of Gene Expression Programming and Clonal Selection[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(6): 662-678
 [8] 李士勇, 李盼池. 基于实数编码和目标函数梯度的量子遗传算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1216-1218
 [9] Blake C, Keogh E, Merz C J. UCI Repository of Machine Learning Databases[EB/OL]. <http://www.ics.uci.edu/~mllearn/MLRepository.html>, 1998
 [10] Michalski R S, et al. Learning patterns in noisy data: The AQ approach[M]. Paliouras G, et al., eds. Machine Learning and Its Applications, Springer-Verlag, 2001, 2049: 22-38
 [11] Brazdil P B, Torgo L. Knowledge acquisition via knowledge integration[M]. Current Trends in Knowledge Acquisition. Amsterdam. The Netherlands, IOS Press, 1990
 [12] Quinlan J R. C4. 5: Programs for Machine Learning[S]. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1993