

不规则海浪的仿真

朱洪华, 蔡建立

(厦门大学 信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 讨论了二维不规则长峰波和三维不规则短峰波的模型建立和仿真, 在 MATLAB 基础上得到了较为理想的海浪模拟结果, 并利用 Visual C++ 开发了一个界面, 用以控制风速变化来查看波形的变化, 最后利用 OpenGL 完成了三维波浪的显示。大量仿真结果证明, 本文所提的方法是可行且有效的, 对实际海浪具有良好的模拟效果。

关键词: 海浪模型; 三维仿真; Matlab 语言; Visual C++; OpenGL

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3044(2007)13-30202-02

Visual Simulation of Irregular Ocean Waves

ZHU Hong-hua, CAI Jan-li

(School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The mathematical models of 2-D irregular long crested waves and 3-D irregular short crested waves are established, and obtain a perfect real wave effect based on Matlab. Exploit an interface based on Visual C++, so we can observe the change of the ocean waves by wind velocity. In the end, finish the vision of 3-D ocean waves. Large amount of simulation experiments indicated that the methods presented in this paper are feasible and effective, which can successfully simulate the real ocean wave.

Key words: ocean wave model; 3-D visual simulation; Matlab language; Visual C++; OpenGL

1 引言

研究海浪及其对工程的作用有三种途径: 一是现场观测研究; 二是在实验室内进行模拟研究; 三是理论分析研究。由于海浪的复杂多变性, 加上现场环境恶劣, 进行现场观测需花费大量人力物力; 理论研究目前也有较大的局限性, 特别是对于不规则波浪, 很多问题有赖于室内的模拟研究。随着电子计算机的发展和普及, 海浪的数值模拟得到迅速发展, 它具有经济方便等优点, 日益受到人们的重视和广泛的应用。[1]

2 二维不规则长峰波海浪仿真

在研究和设计海洋运动体运动控制系统时, 经常需要研究海浪对海洋运动体及其控制系统产生的影响。因此, 必须有一个较理想的海浪信号来研究上述问题。海浪的仿真可以解决这个问题。海浪的仿真是一个比较复杂的问题。如果用规则波研究这些问题, 则由于不反映实际的海浪, 结果常是不能令人满意的。本文采用的方法不但能仿真多种长峰波海浪, 而且可以灵活地改变它的参数来满足各种使用要求。

2.1 线性波浪叠加法

海浪的形成有各种原因, 例如风、海啸和潮汐都可引起海浪。最常见的是由风形成的海浪, 也就是常说的风浪。由风形成的海浪是不规则的, 对于充分成长的风浪, 在船舶运动研究中, 经常认为是一个平稳随机过程。对于成长期的海浪, 则不能认为是一个平稳随机过程。在设计船舶运动控制系统时, 为了研究方便, 常把海浪作为一个平稳随机过程处理。它可由多个不同周期和不同随机初相位的余弦波叠加而成:

$$(t) = \sum_{i=1}^M a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \phi_i)$$

式中, (t) 为波动水面相对于静水面的瞬时高度, a_i, k_i, ω_i 为第 i 个组成波的振幅, 波数和角频率。 ϕ_i 为在 $(0, 2\pi)$ 范围内均布的随机初相位。 x, t 分别表示位置和时间, 通常固定位置, 可取 $x=0$ 。

这里通过频谱来模拟海浪。设欲模拟的对象谱 $S(\omega)$ 的能量绝大部分分布在 $L \sim H$ 范围内, 其余部分可略而不计。把频率范围划分成 M 个区间, 其间距为 $\omega_i = \omega_{i-1} + \Delta\omega$, 取 $a_i = \sqrt{2S(\omega_i)}$, 则将代表 M 个区间内波能的 M 个余弦波叠加起来, 即得海浪的波

$$\text{面: } (t) = \sum_{i=1}^M \sqrt{2S(\omega_i)} \cos(\omega_i t + \phi_i)$$

2.2 长峰波随机海浪的仿真

首先要选择海浪频谱, 目前可供选择的海浪谱比较多, 本文选用较为常用的 P-M 谱[2]为例来进行仿真。P-M 谱的表达式为: $S(\omega) = (8.1 \times 10^{-3} g^2 / v^5) \exp[-0.74(g/v)^4]$, v 为海面上 19.5m 处的平均风速。

理论上海浪频谱的分布频率为 0~无穷大, 但仿真时不可能对所有的频率的谐波进行仿真, 只能取其影响较大的频段来仿真。另外, 为了达到实时仿真, 必须提高仿真速度, 所以也只能选择有限的频段来仿真。各种海浪的频谱都是窄带谱, 它们的能量主要集中在某一频段, 特别在高海情的情况下, 能量更是集中在某一频段。于是, 我们选取某一频段中的有限个谐波进行仿真, 仿真结果可以保持较高的精度。在仿真中采用下表所列的一组参数, 表中将海情分成四种情况。

表 1 不同海情的仿真频段和频率增量

风速/(m/s)	仿真频段/(rad/s)	频率增量/(rad/s)
<8	0.4~3.4	0.1
8~12	0.35~2.75	0.08
12~16	0.2~2.0	0.06
>16	0.1~1.3	0.04

为了检验所仿真的海浪是否符合要求的海浪频谱, 再把仿真的海浪离散化, 并利用快速傅里叶变换 (FFT) 进行频谱分析。根据频谱分析得到的所仿真的海浪频谱同要求的海浪频谱进行比较分析误差。本文利用 MATLAB 强大的计算和绘图功能来实现上述的仿真。MATLAB 以矩阵作为数据操作的基本单位, 还提供了十分丰富的数值计算函数。MATLAB 和著名的符号计算语言 Maple 相结合, 使得 MATLAB 具有符号计算功能。MATLAB 提供了两个层次的绘图操作: 一种是对图形句柄进行的低层绘图操作, 另一种是建立在低层绘图操作之上的高层绘图操作。MATLAB 具有程序结构控制、函数调用、数据结构、输入输出、面向对象等程序语言特征, 而且编程效率高。[3]图 1 为风速为 7m/s 时的仿真图, 图 2 为风速为 7m/s 时的误差对比图 (* 为标准频谱图)。从图中可以看出, 此次仿真的误差还是比较小的。

收稿日期: 2007-04-23

基金项目: 厦门大学 985 工程资助项目

作者简介: 朱洪华 (1983-), 男, 福建莆田人, 硕士生, 主要研究方向: 信号与图像处理, 船舶运动建模与预报; 蔡建立 (1950-), 男, 福建厦门人, 厦门大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 信号与图像处理, 船舶运动建模与预报。

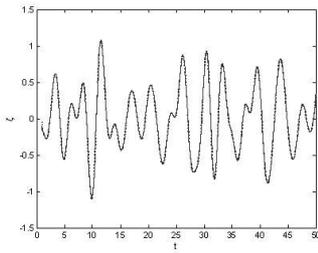


图1 V=7m/s的仿真图

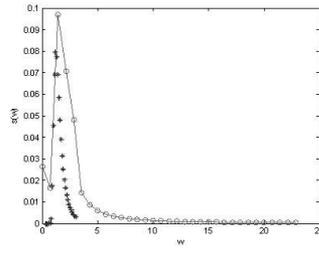


图2 V=7m/s的误差对比图

3 人机交互界面的制作

本文利用 Visual C++ 6.0 编程工具[4], 采用面向对象的编程技术, 开发了人机交互界面, 人机对话界面如图 3 所示。Visual C++ 是一个功能强大的可视化软件开发工具。自 1993 年 Microsoft 公司推出 Visual C++1.0 后, 随着其新版本的不断问世, Visual C++ 已成为专业程序员进行软件开发的首选工具。虽然微软公司推出了 Visual C++.NET(Visual C++7.0), 但它的应用的很大的局限性, 只适用于 Windows 2000, Windows XP 和 Windows NT4.0。所以实际中, 更多的是以 Visual C++6.0 为平台。Visual C++6.0 不仅是一个 C++ 编译器, 而且是一个基于 Windows 操作系统的可视化集成开发环境(integrated development environment, IDE)。Visual C++6.0 由许多组件组成, 包括编辑器、调试器以及程序向导 AppWizard、类向导 Class Wizard 等开发工具。这些组件通过一个名为 Developer Studio 的组件集成为和谐的开发环境。

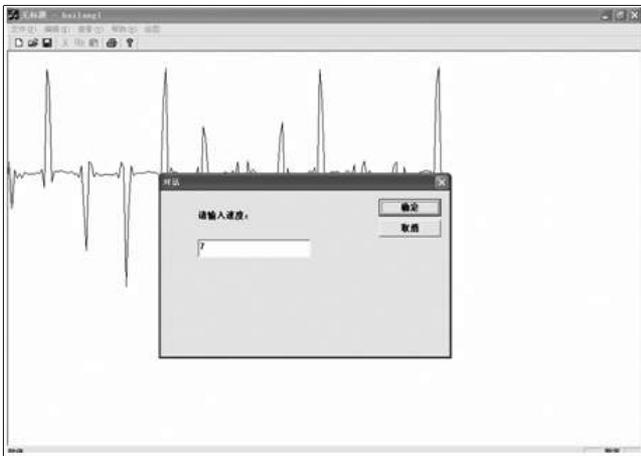


图3 人机对话界面

4 三维不规则短峰波海浪仿真

在上面我们把海浪作为二维波处理, 实际上海面上的波浪是极为复杂的, 它是不规则的随机波。海面上经常出现的波浪是由风产生的风浪。因为风的随机性和风向的多变性, 所以风浪不但会向一个方向传播, 而且还会向其它方向传播。常见的风浪的波面像一个个大小形状不等的小丘。设地面坐标系 E- 的 E 平面与海平面重合, 则风浪的起伏高度 在此坐标系内可用一个三元函数来表示。设 (x, y, t) , 其中 t 为时间, 故称此海浪为“三元不规则波”, 或称“短峰波”。

4.1 频率方向对应法

由于多向不规则波的波能同时分布在一定的频域和方向范围内, 可把频域分割成 M 份, 方向分割成 I 份, 共有 $M \times I$ 个组成单元。把每个单元的组成波看成简谐波, 其振幅为:

$$a_{mi} = \sqrt{2S(m_i)} \cdot m_i$$

各组成波叠加而成的多向不规则波为:

$$(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I a_{mi} \cos[m_t - k_m(x \cos i + y \sin i)]$$

$$m = \frac{m_i}{2 + (i-1) \cdot \text{RAN}(m_i)} \quad // \\ = (r \cdot j) / M$$

$$m_i = (m_i + m_j) / 2$$

此处 $\text{RAN}(m_i)$ 为在 $(0, 1)$ 内均匀分布的随机数。引入它是避免模拟所得波浪以 $2 \cdot I /$ 周期重复出现。此时在同一频段内, 每一个方向的组成波的代表频率 m_i 都不同, 即每一频率对应一个方向, 故称之为频率方向对应法。[1]

4.2 三维短峰波随机海浪的仿真

三维短峰波随机海浪的仿真可以采用同时对 X, Y, T 取样来生成三维海浪场数据, 可以得到较为逼真的仿真图, 但是采用这种方法计算三维海浪数据时, 计算量较大, 因为每一帧的数据都要经过五重循环计算。所以, 为了满足实时仿真, 我们采用了计算和显示分开的策略, 即先产生海浪数据, 再将其保存起来, 然后再调用此数据进行三维显示。

本课题的三维动态显示部分采用 OpenGL 函数实现[5]。OpenGL 是个专业的 3D 程序接口, 是一个功能强大, 调用方便的底层 3D 图形库。OpenGL 的前身是 SGI 公司为其图形工作站开发的 IRIS GL。IRIS GL 是一个工业标准的 3D 图形软件接口, 功能虽然强大但是移植性不好, 于是 SGI 公司便在 IRIS GL 的基础上开发了 OpenGL。OpenGL 的英文全称是“Open Graphics Library”, 顾名思义, OpenGL 便是“开放的图形程序接口”。虽然 DirectX 在家用市场全面领先, 但在专业高端绘图领域, OpenGL 是不能被取代的主角。OpenGL 是个与硬件无关的软件接口, 可以在不同的平台如 Windows 95、Windows NT、Unix、Linux、MacOS、OS/2 之间进行移植。因此, 支持 OpenGL 的软件具有很好的移植性, 可以获得非常广泛的应用。所以我们利用 OpenGL 在 PC 机上较容易实现三维建模, 并且使程序具有了较好的可移植性, 而且取得了满意的显示速度和显示效果。如图 4 所示。

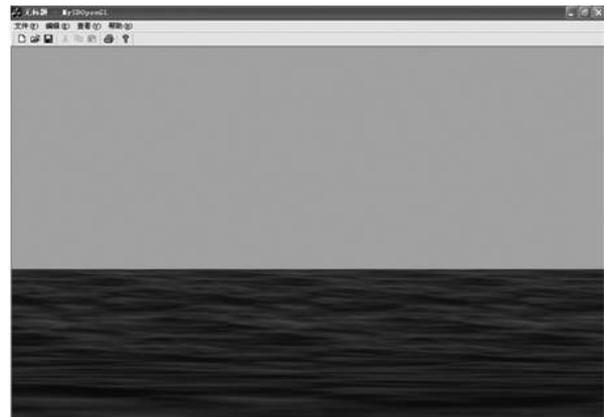


图4 三维海浪仿真显示结果

5 结论

本文基于海浪数学模型, 实现了海浪的二维和三维模拟, 在三维图像的处理上采用了 OpenGL 函数实现, 仿真结果具有良好的视觉真实感, 同时采用将计算和显示分开的策略, 使仿真具有更快的速度, 基本上可以达到实时仿真。对比有关海浪研究及其仿真领域的历史和现状, 我们所做的工作对其它需要进行海浪场仿真的场合, 具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连理工大学出版社, 2003.11
- [2] 金鸿章, 姚绪梁. 船舶控制原理[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 2001
- [3] 周金萍. MATLAB 6.5 图形图像处理与应用实例[M]. 科学出版社, 2003.08.
- [4] 王华, 叶爱亮. VC++6.0 编程实例与技术[M]. 机械工业出版社, 1999.
- [5] 白建军, 朱亚平, 梁辉, 姚东等. OpenGL 三维图形设计与制作[M]. 人民邮电出版社, 1999.