

航海模拟器视景中 海浪的模拟

尹 勇 任鸿翔 李永进 编著



大连海事大学出版社

航海模拟器视景中海浪的模拟

尹 勇 任鸿翔 李永进 编著

大连海事大学出版社

© 尹 勇, 任鸿翔, 李永进 2010

图书在版编目 (CIP) 数据

航海模拟器视景中海浪的模拟 / 尹勇, 任鸿翔, 李永进编著. —大连: 大连海事大学出版社, 2010.10

ISBN 978-7-5632-2485-2

I. ①航… II. ①尹… ②任… ③李… III. 航海—模拟器—视景模拟: 海浪模拟 IV. ①U666.158

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 202304 号

大连海事大学出版社

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996
<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连印刷三厂印装

大连海事大学出版社发行

2010 年 10 月第 1 版

2010 年 10 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 140 mm × 203 mm

印张: 7

字数: 185 千

印数: 1~500 册

责任编辑: 姜建军

版式设计: 晓 江

封面设计: 王 艳

责任校对: 沈荣欣

ISBN 978-7-5632-2485-2

定价: 15.00 元

前 言

海浪的模拟是计算机图形学中最具挑战性的研究问题之一,在游戏、影视、广告、视景仿真等领域有着越来越广泛的应用。航海模拟器的视景为模拟器操纵者提供了海上训练任务的虚拟景象,其中显示的海浪约占整个视景的一半区域,因此海浪是航海模拟器视景的重要组成部分,也是评价航海模拟器视景系统好坏的关键依据之一。航海模拟器中的海浪模拟不同于游戏、动画、影视等的海浪模拟,后者主要关注实时性和真实感,前者在关注这两方面的同时,还强调绘制的科学性。大连海事大学航海动态仿真与控制交通行业重点实验室在航海模拟器的研制过程中,对于海浪的模拟投入了较大的力量,近十年来,金一丞教授培养的博士尹勇、解翠、任鸿翔、李永进等先后提出了一些相关算法,发表论文近二十篇,并将这些算法成功应用到航海模拟器中,有效提高了视景的实时性和真实感。

为了使有志于从事航海模拟器视景仿真研究的学者尽快掌握海浪模拟的理论、技术和方法,作者基于多年的研究和实践撰写了本书。本书主要阐述了波浪的基本理论、航海模拟器的视景系统、GPU 技术以及 OpenSceneGraph 视景管理平台,并按研究的先后顺序分别介绍了尹勇、任鸿翔、李永进三人的研究工作。

本书共 6 章,各章节主要内容如下:

第1章介绍了航海模拟器发展现状以及航海模拟器的视景系统,并对海浪模拟的算法进行了分类和总结。

第2章对波浪基础理论知识进行了研究。

第3章分析了 GPU 技术以及 OpenSceneGraph 视景管理平台。

第4章介绍了一种基于波浪谱的海浪模拟算法。该算法对波浪谱进行自适应离散化处理,并将处理后的数据应用于不规则波的仿真模型中,用网格模型和纹理映射技术实现了波浪的实时动态模拟;分析了海面浪花形成条件,用粒子系统实现了海面浪花的实时动态仿真;基于粒子系统和图像综合实现了船舶航迹流及船舶兴波的实时动态仿真。

第5章介绍了一种基于 GPU 的真实感海浪绘制算法。首先采用同心圆网格模型构建海浪表面;采用基于 GPU 的 FFT 方法生成符合 Phillips 谱的海浪高度图,从而用网格构建出了海浪的几何形状;而后模拟了 Choppy 波,减轻了磁砖效应,实现了海浪与船舶的相对运动;最后分别模拟了海面的反射、折射以及浪花效果。

第6章介绍了一种模拟大规模近岸海浪的算法。该算法根据不同的海浪数学模型,给出了基于 Boussinesq 方程、基于椭圆型缓坡方程、基于抛物型缓坡方程、基于 SWAN 模型等四种海面运动建模方法;对大规模近岸海面的几何建模与实时绘制进行了研究,并采用扇形海面的几何建模方法和基于 GPU 来模拟海面反射、折射、泡沫、眩光和浪花等光影效果。

本书第2、4章由尹勇撰写;第1、3、5章由任鸿翔撰写;第6章由

李永进撰写。在本书的撰写过程中，金一丞教授给予了悉心的指导。本书反映了作者的最新研究成果，对从事航海模拟器以及视景仿真的学者具有一定的借鉴意义。

在本书出版之际，衷心感谢大连海事大学领导对我们研究工作的支持。感谢金一丞教授对本书的悉心指导及宝贵意见。感谢张显库教授对本书的大力支持和帮助。感谢大连海事大学出版社编辑为策划、编辑和出版本书所付出的辛劳。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大专家读者批评、指正。

编著者

2010年8月 于大连

内 容 简 介

航海模拟器的视景为模拟器操纵者提供了海上训练任务的虚拟景象,其中显示的海浪约占整个视景的一半区域,因此海浪是航海模拟器视景的重要组成部分,也是评价航海模拟器视景系统好坏的关键依据之一。大连海事大学在航海模拟器的研制过程中,对于海浪的模拟也投入了较大的力量,先后提出了一些相关算法,并将这些算法成功应用到航海模拟器中,有效提高了整个视景的实时性和真实感。

为了使有志于从事航海模拟器视景仿真研究的学者尽快掌握海浪模拟的理论、技术和方法,作者基于多年的研究和实践撰写了本书。本书主要介绍和论述了波浪的基本理论、航海模拟器的视景系统、GPU 技术、OpenSceneGraph 视景管理平台、基于波浪谱的海浪模拟算法、基于 GPU 的绘制高真实感海浪算法以及大规模近岸海浪的模拟算法。本书反映了作者的最新研究成果,对从事航海模拟器以及视景仿真的学者具有一定的借鉴意义。

本书可以作为计算机图形学或虚拟现实专业高年级本科生和研究生教材使用,也可供三维图形学领域专门研发人员,尤其是研究海浪模拟的科研人员参考、借鉴。

目 录

第1章 绪 论.....	(1)
1.1 航海模拟器概述.....	(1)
1.2 航海模拟器的视景系统及DNV相关标准.....	(2)
1.3 航海模拟器及其视景系统的发展现状.....	(4)
1.3.1 国外发展现状.....	(4)
1.3.2 国内发展现状.....	(6)
1.4 航海模拟器中海浪的模拟.....	(8)
1.4.1 基于构造的方法.....	(9)
1.4.2 基于物理模型的方法.....	(10)
本章参考文献.....	(13)
第2章 波浪理论.....	(17)
2.1 海浪概述.....	(17)
2.2 波浪理论.....	(20)
2.2.1 微小振幅波.....	(20)
2.2.2 有限振幅波.....	(24)
2.2.3 波浪谱.....	(28)
本章参考文献.....	(33)
第3章 GPU技术与视景的组织管理.....	(35)
3.1 GPU技术.....	(35)
3.1.1 图形绘制流水线.....	(35)
3.1.2 GPU的发展历程.....	(38)
3.1.3 GPU的主要技术.....	(41)
3.1.4 GPU编程.....	(43)
3.1.5 GPU在计算机图形学中的应用.....	(46)

3.1.6 GPU展望.....	(48)
3.2 视景的组织.....	(49)
3.2.1 视景建模工具.....	(49)
3.2.2 OpenFlight数据格式.....	(50)
3.2.3 航海模拟器视景的高效组织.....	(51)
3.3 视景管理平台.....	(56)
3.3.1 视景管理平台.....	(56)
3.3.2 OpenGVS视景管理.....	(58)
3.3.3 OSG视景管理.....	(59)
本章参考文献.....	(64)
第4章 基于波浪谱的海浪模拟算法.....	(68)
4.1 海浪实时生成模型.....	(68)
4.1.1 海浪的数学模型.....	(68)
4.1.2 由波浪谱确定某一浪级的仿真参数.....	(69)
4.1.3 海浪的实时生成算法.....	(76)
4.2 浪花的生成条件和浪花的动态仿真实现.....	(81)
4.2.1 浪花的生成条件分析.....	(81)
4.2.2 浪花的动态仿真实现.....	(84)
4.3 船舶航迹流和兴波的实时仿真.....	(85)
4.3.1 基于粒子系统和图像综合的船舶航迹流模型.....	(86)
4.3.2 基于粒子系统和图像综合的船舶兴波实时动态仿真....	(91)
4.3.3 算法效率的考虑及实现.....	(95)
本章参考文献.....	(97)
第5章 基于GPU的海浪真实感绘制算法.....	(98)
5.1 海平面网格模型的建立.....	(99)
5.2 高度图的生成.....	(101)

5.2.1	傅立叶变换及FFT算法的GPU实现.....	(102)
5.2.2	高度图和法线图的生成.....	(106)
5.3	海面光照及特殊效果.....	(115)
5.3.1	反射效果.....	(117)
5.3.2	折射效果.....	(119)
5.3.3	浪花.....	(120)
5.4	算法流程与结果分析.....	(121)
5.4.1	算法流程图.....	(121)
5.4.2	算法绘制效果.....	(122)
5.4.3	算法对比.....	(124)
5.5	小结.....	(124)
	本章参考文献.....	(124)
第6章	大规模近岸海浪的模拟.....	(127)
6.1	近岸海浪概述.....	(127)
6.1.1	近岸海浪的传播与变形.....	(127)
6.1.2	近岸海浪的数值模拟.....	(130)
6.1.3	航海模拟器中近岸海浪模拟技术的研究现状.....	(135)
6.1.4	本章内容介绍.....	(136)
6.2	基于Boussinesq方程的较小范围近岸波浪运动建模.....	(137)
6.2.1	Boussinesq方程概述.....	(137)
6.2.2	基于Boussinesq方程的海面运动建模.....	(139)
6.2.3	算法实现及应用.....	(144)
6.2.4	小结.....	(153)
6.3	基于椭圆型缓坡方程的中等范围近岸波浪运动建模.....	(154)
6.3.1	椭圆型缓坡方程概述.....	(155)
6.3.2	基于缓坡方程的海面运动建模.....	(157)
6.3.3	算法实现与应用.....	(161)

6.3.4 小结.....	(169)
6.4 基于抛物型缓坡方程的较大范围近岸海面运动建模.....	(169)
6.4.1 抛物型缓坡方程概述.....	(170)
6.4.2 基于抛物型缓坡方程的波浪运动建模.....	(171)
6.4.3 算法实现及应用.....	(174)
6.4.4 小结.....	(180)
6.5 基于随机波浪理论的大范围近岸波浪运动建模.....	(181)
6.5.1 SWAN模型概述.....	(181)
6.5.2 基于SWAN模型和FFT方法的波面运动建模.....	(184)
6.5.3 算法实现及应用.....	(185)
6.5.4 小结.....	(191)
6.6 大规模近岸波浪的几何建模与绘制.....	(192)
6.6.1 大规模近岸波浪的几何建模.....	(192)
6.6.2 大规模近岸波浪的绘制.....	(196)
6.6.3 算法实现及应用.....	(198)
6.6.4 小结.....	(202)
本章参考文献.....	(203)

第1章 绪论

1.1 航海模拟器概述

航海模拟器是一种典型的人在回路中的仿真系统^[1]。该系统为每一个仿真对象——“本船”建立船舶运动数学模型；系统运行时，由模型解算程序根据每条船的特性数据、航行环境以及操纵指令计算采样时刻本船运动参数；视景系统根据上述信息，用计算机成像技术实时生成该时刻能充分体现本船运动的虚拟视景。位于驾驶台中的操纵者犹如驾驶一条实船在创建的虚拟视景中航行，期间操纵者通过视景提供的视觉信息以及驾驶台中各种仿真仪器（表）提供的航行信息，操纵车、舵等设备，达到教学培训或科学试验的目的。

自20世纪60年代第一台航海模拟器在荷兰问世以来，航海模拟器的作用已得到航运界和航海院校的充分肯定，并受到普遍欢迎和重视。20世纪70年代以来，随着计算机技术的高速发展以及航海教育与培训要求的逐步提高，航海模拟器不断更新，模拟器功能日臻完善。航海模拟器已从早期简单的“雷达模拟器”、“ARPA 模拟器”和“雷达与导航模拟器”，发展到有视景的“船舶操纵模拟器”；从单船模拟器发展到多本船航海模拟系统^[2]；从局域网系统发展到互联网系统^[3,4]。航海模拟器的用途也由船员教育和培训扩展到船舶通航安全评估^[5]、港航设计方案论证^[6,7]等方面。

按功能划分，目前一套完整的航海模拟器一般包括：视景系统、船舶运动解算系统、模拟船桥、教练员站、通信及网络系统等。航海模拟器的视景系统为模拟器操纵者提供了一个实际训练任务中的景象，视景



系统显示的内容应包括水面、四周的陆地、人文景观(桥梁、码头、建筑物等)、目标船、助航设施、灯塔、从船桥可以观察到的本船结构^[8]。船舶运动解算系统根据船舶操纵者通过各种操纵设备发出的指令,利用船舶操纵数学模型正确地计算系统中各本船的运动状态及姿态。模拟船桥主要为模拟器操纵者提供船舶驾驶室的操纵设备,并将物理设备与虚拟视景分隔开以增强操纵者的沉浸感。教练员站主要为教练员提供友好的可视化界面,通过这种界面教练员可以制作、编辑各种练习,控制系统的运行,对各本船进行监视,记录和打印模拟结果。通信及网络系统通过电话、模拟电台和计算机网络等保证教练员与船舶操纵者之间能够进行正常的交流、系统中各计算机之间能够进行实时的通信。

1.2 航海模拟器的视景系统及 DNV 相关标准

由于视觉可为人们提供 70% 以上的有用信息,因此视景系统是模拟器操纵者获取信息的最直接、数量最大的来源,视景系统的好坏已成为评价航海模拟器成败的关键^[9],一个好的视景系统可以使操纵者具有身临其境的感觉。

近年来,一些国家或著名船级社对航海模拟器的视景系统提出了要求,制定了相应的标准,其中比较有代表性的是挪威船级社(DNV)提出的航海模拟器认证标准(Standard for Certification No.2.14 Maritime Simulator System (January 2000))^[10],该标准将航海模拟器分成 A、B、C、X 四级,并对各级的主要性能指标做了要求。

航海模拟器的视景系统同其他仿真系统一样,考虑的最主要因素是系统的实时性和真实感。系统的实时性主要由更新速率体现,DNV 标准要求 A 级航海模拟器视景的更新速率不低于 20 帧/秒。更新速率与图像分辨率、视景的复杂度和逼真度紧密相关,同样也与系统成本紧密相关。系统的真实感主要体现在视景的复杂度、逼真度和图像质量等方面,



DNV 标准要求 A 级航海模拟器视景显示的物标应具有足够的真实感(详细到足以像真实的物标那样得以辨认)。表 1.1 列出了 DNV 为 A 级航海模拟器视景系统制定的认证标准。

表 1.1 DNV 的 A 级航海模拟器视景系统认证标准

1	模拟器必须能显示至少 10 种不同种类的目标船, 目标船均具有数学模型, 模型顾及外力包括流、风、波浪对其运动、漂移、航向角的影响
2	目标船应配备航路规则要求的号灯、号型、声响信号。上述信号可以由教练员分别加以控制, 声响信号须有方向性且随距离衰减。天气晴好时, 每艘船的外形应在 6 海里距离时得以辨认。在航船应具有相应的艏艉浪花
3	模拟器应能同时显示至少 20 艘目标船。教练员可以分别为每一艘船编制航行路线
4	模拟器应提供白天、黄昏、晚上真实的视景, 包括可变化的天气能见度、改变时间。有可能创建从浓雾到晴朗范围内不同的视觉条件
5	视景系统和/或运动平台能充分体现本船六自由度运动
6	视景的更新速率至少为 20 Hz, 具有 2.5 弧分的角分辨率
7	视景投影的放置距离和方式应能保证从驾驶台准确测量视景中的物标方位。能使用望远镜系统作观测
8	视景系统应能显示环水平方向的外景 (360°), 水平视场角可以以下述方式获得, 即至少 240° 的视景, 其余部分通过漫游(转动“相机”)观察
9	视景系统必须显示至少 25° 的垂直观场角。此外, 可以通过其他任何方式, 在系统作业时观察到本船侧面与码头
10	视景系统应显示与所用海图相对应的导航标志
11	视景显示的物标应具有足够的真实感(详细到足以像真实的物标那样得以辨认)
12	模拟器应能提供与所模拟的状况相对应的环境声响(例如风)
13	航行水域应包括与所使用海图相对应的随时间变化的流模型, 潮水应有反映
14	模拟应提供方向、强度可以变化的波浪



2007 年 10 月, DNV 又提出了航海模拟器的新认证标准, 与原有标准相比, 新标准对视景系统提出了更高的要求, 如视景的更新速率不低于 30 帧/秒; 能同时显示至少 100 艘目标船; 可模拟缆绳、拖带作业的受力过程等^[11]。

1.3 航海模拟器及其视景系统的发展现状

航海模拟器经过四十多年的发展和更新, 已从单一品种、单一功能的设备发展成为类型丰富、功能完备的综合系统, 已成为虚拟现实技术应用的重要领域。

1.3.1 国外发展现状

目前, 国外航海模拟器主要由英国 Transas、挪威的 Kongsberg、美国 Ship Analytics 等商业性公司研制和开发。

Transas 公司生产的 NTPRO4000 模拟器如图 1.1 所示^[12]。其视景系统以微机、三维图形加速卡为硬件平台, 三维视景数据库的建模由自己的建模工具 Scene Editor 和 Model Editor 完成, 地形模型可以由海图数据自动生成, 雷达图像由海图数据和地形数据获得, 视景管理采用 OpenGL 图形技术。该模拟器的视景系统具备足够的行为真实感, 视景的主要内容包括: (1) 天空。云、霾、雨; (2) 海面。三维纹理波浪, 波浪的大小、风力、风向与本船运动相关; (3) 本船。详细的船艏图像及纹理; (4) 其他视景。目标船、码头上的景物、导航标志等。该模拟器视景系统的主要功能有: (1) 能模拟体现本船六自由度运动的视景; (2) 视景系统的水平视场角 (Horizontal Field of View, HFOV) 可以达到 360° ; (3) 能模拟白天、夜晚、晨昏朦影以及明朗、淡雾、浓雾等不同能见度; (4) 提供多个海域或港区的三维视景, 并可根据用户提供的必要资料来



定做新的海域或港区的三维视景，以及与三维视景匹配的电子海图和雷达图像。Transas 公司生产的 NTPRO4000 模拟器符合 STCW 公约的各项规定。



图 1.1 NTPRO4000 模拟器



图 1.2 Polaris 系列全任务模拟器

Kongsberg 公司的模拟器产品相当丰富^[13]，Polaris 系列作为其第六代船桥模拟器，可分为全任务系统（如图 1.2 所示）、多任务系统、有限任务系统和特定任务系统四类产品。Kongsberg 设计和生产许多实际的

船用设备, Polaris 系列仿真驾驶台采用了与实际设备相同或相近的设计, 许多仿真设备面板与实际设备相同, 整个驾驶台环境与实际船舶非常接近, 具有很好的真实感。Polaris 系列模拟器的视景系统采用了 Multigen Creator 作为建模软件, 三维视景数据库采用了 OpenFlight 格式。视景系统的主要功能及特点有: (1) 视景系统的 HFOV 可达 360° ; (2) 波高可达 16 m 的三维海浪模型, 具有多级别的海况控制, 能显示风吹起的浪花、水中倒影、高度真实的冰等效果; (3) 天空能够显示太阳、星星以及雾、云、雨、雪等效果; (4) 靠泊时驾驶台侧翼视点的控制; (5) 能够体现软管在水中的运动以及缆绳的状态。Polaris 系列模拟器符合 STCW95 公约的各项要求, 不但通过了 DNV 船级社的认证, 而且通过了俄罗斯、英国、美国等权威机构或主管机关的认证。

Ship Analytics 公司的全任务航海模拟器具有高仿真度的船桥设备^[14], 包括 Radar/ARPA、GPS、Loran C 等, 采用六自由度的船舶数学模型。视景系统的主要功能有: (1) 能体现本船六自由度运动的高性能、高分辨率视景系统; (2) 视景系统的 HFOV 可以达到 360° ; (3) 可以模拟白天、黑夜以及能见度不良等状况; (4) 目标船、航标、建筑物等具有真实的视觉体现; (5) 多条本船、拖船、码头之间的真实交互作用。Ship Analytics 公司的全任务航海模拟器完全满足 STCW95 公约的要求; 模拟的 Radar/ARPA、GMDSS 和其他电子导航仪器符合 IMO 的要求。

1.3.2 国内发展现状

20 世纪 80 年代初, 我国航海院校陆续从挪威、英国等传统航海强国引进航海模拟器, 这对我国应用航海模拟器从事航海教学与培训起到了很重要的作用。但是由于不掌握核心技术, 给相关工作造成很多不便, 又由于没有竞争对手, 模拟器价格始终居高不下。为了彻底摆脱这种局面, 大连海事大学和上海海事大学从 20 世纪 80 年代末开始了自行研制

