海面背景红外实时仿真

石 坤[1,2,3],郝颖明[1,3],王明明[1,2,3],付双飞[1,3]

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所,辽宁 沈阳 110016;2. 中国科学院研究生院,北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室,辽宁 沈阳 110016)

摘 要:海面背景红外实时仿真方法研究在现代红外技术发展中具有重要的理论意义和应用价值。结合现有计算机软硬件条件,引入多种优化技术,提出一种海面背景红外实时仿真方法,实现了较高帧速的海面背景红外实时仿真。使用 2D FFT 技术快速计算海面几何模型数据,引入 Geomipmap 技术优化组织海面几何模型数据,利用 GPU 加速红外辐射计算,提出预生成离线数据技术和基于视点渲染的技术,提高了实时渲染速度。实验结果表明,该方法生成的红外海面背景渲染速度可达到 300 帧/s 以上,满足实时仿真的要求,同时,为仿真系统中其他部分的仿真预留出了较多计算资源。

关键词:红外海面背景; 实时仿真; 2D FFT; Geomipmap; GPU

中图分类号:TN216 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2012)01-0025-05

Real-time simulation method of infrared sea background

Shi Kun[1,2,3], Hao Yingming[1,3], Wang Mingming[1,2,3], Fu Shuangfei[1,3]

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: It has important theoretical significance and application value to study the real-time simulation technology of infrared sea background. Considering the conditions of existing computer software and hardware, a sea background infrared real-time simulation method was presented, which introduced a variety of optimization techniques, and achieved a higher frame rate of the sea background infrared real-time simulation. The 2D FFT technique was used to fast compute the geometric model data of sea, and the Geomipmap technology was introduced to optimize the organization of sea geometry model data. To accelerate the infrared radiation computing, the GPU was used. In order to improve the real-time rendering speed, pregenerated off-line data technique and view point based rendering technique were proposed. The result shows that the rendering speed of infrared sea created by the method can achieve 300 frame/s, meets the requirement of real-time simulation, and reserves more computing resource for other simulation parts of simulation system.

Key words: infrared sea background; real-time simulation; 2D FFT; Geomipmap; GPU

收稿日期:2011-05-12; **修订日期**:2011-06-19

基金项目:中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-11-S100)

作者简介:石坤(1985-),男,硕士生,主要从事实时红外仿真方法研究。Email:shikun@sia.cn

导师简介:郝颖明(1966-),女,研究员,硕士生导师,博士,主要从事图像处理与目标识别、三维位姿测量、视觉应用系统及红外视景仿真方面的研究。Email:ymhao@sia.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

作为红外场景的主要组成部分，海面背景红外实时仿真技术研究在现代红外技术发展中具有重要的理论意义和应用价值。理论上，丰富了背景红外实时仿真方法，推进了国内实时红外方法技术的发展。应用上，提供有效的海面背景红外实时仿真方案，为建立具有自主知识产权的实时红外仿真平台奠定了基础。

相比西方国家，国内在计算机红外视景仿真方面研究起步较晚，但近些年也取得了许多研究进展。红外海面背景方面，西安电子科技大学[1]、上海交通大学[2-3]等院校先后研究了海面红外辐射特性，建立了海面红外辐射计算模型，并基于提出的模型，模拟生成了海面红外图像。哈尔滨工程大学、清华大学等院校在海面几何建模方面进行了相关的研究，结合现有技术条件，提出了多种模拟动态波浪海面效果的仿真方案[4]。

随着计算机硬件和软件技术的发展，使得海面背景红外实时仿真成为可能。参考文献[5]中提出了基于PC机图形硬件的红外海面仿真方法，实现了单一海面场景的红外实时仿真。从仿真结果看，虽然达到了实时仿真，但帧速较低，占用的计算资源过多，当集成到仿真系统中时，仍无法满足实时性要求。

文中结合现有计算机软硬件条件，引入多种优化技术，提出一种海面背景红外实时仿真方法。该方法在保证海面红外效果的前提下，以最大限度地降低实时计算代价、提高仿真速度为目标。在应用于红外仿真系统中时，为其他计算(如天空背景和海面目标)预留更多资源，满足仿真系统的实时性要求。

1 海面背景几何建模

1.1 2D FFT 快速计算海面高度场数据

使用经典的Gerstner-Wave波模拟生成波浪海面高度场数据。Gerstner-Wave波由一系列不同频率和振幅的余弦波叠加组成，是典型的乘加运算，可以使用2D FFT技术来快速计算生成海面高度场数据[6]。

1.2 海面几何模型生成

Geomipmap技术[7]类似于计算机图形学中纹理采样的Mipmap技术，与Mipmap技术针对纹理贴图优化不同，Geomipmap技术是针对大面积地形渲染而提出的一种优化地形数据的技术。其基本原理如图1所示。最下一层是原始地形数据，文中是来自于1.1节计算生成的海面高度场数据，数据大小一般是$2^n\times2^n$；第二层保存对原始数据的降低分辨率采样后的数据，采样后的数据依然渲染原始大小的地形；依照此原理，上一层均保存对下一层1/2分辨率采样后的数据。

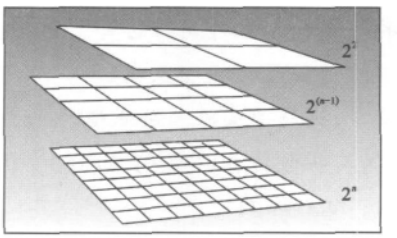

图1 Geomipmap技术示意图

Fig.1 Diagram of Geomipmap technique

Geomipmap技术在保证大面积地形渲染效果前提下，大大减少了渲染数据量。当地形距离视点近时，选用高分辨率的地形数据；当地形距离视点远时，则不必渲染地形的细节信息，选用低分辨率的地形数据。研究中运用Geomipmap技术组织海面高度场数据，生成海面几何模型，如图2所示。

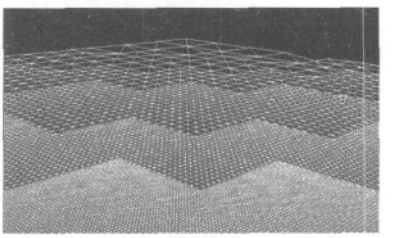

图2 运用Geomipmap技术生成的海面几何模型

Fig.2 Sea geometric model created with Geomipmap technology

2 海面背景红外辐射建模

2.1 海面红外辐射组成

海水表面红外辐射亮度L/W·m^{-2}·sr^{-1}可表示为：

$$L=\tau\varepsilon L_{bb}(T_{sea})+\tau\rho L_{sun}+\tau\rho L_{sky}+L_A \tag{1}$$

式中：τ为大气透过率；ε为海表面发射率；ρ为海表面反射率；$L_{bb}(T_{sea})$为海水黑体辐射亮度；L_{sun}为海表面接收到的太阳直射辐射亮度；L_{sky}为海表面接收到的天空辐射亮度；L_A为海表面到探测器的大气路程辐射亮度。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在这里没有考虑大气透过率和大气路程辐射。由于风和重力的影响,实际海面总是布满波浪,海面波浪起伏对海面的发射和反射都将造成影响。精确描述海面发射率的模型较复杂,在实时仿真领域不具有实际应用价值。从工程计算角度考虑,在海面发射率计算中采用 Wilson 公式[8]:

$$\varepsilon_\theta=0.98[1-(1-\cos\theta)^5] \tag{2}$$

式中:θ 为探测方向与海面小波面法线之间的夹角。

海水在当前红外研究的两个主要波段 (3~5 μm 和 8~12 μm)可以看成是不透明体[9],当光线透过大气入射到海面上后,一部分被反射(ρ),其余的则被海水完全吸收(α),如公式(3)所示:

$$\rho=1-\alpha \tag{3}$$

根据 Kirchhoff 定律得:

$$\rho=1-\alpha=1-\varepsilon \tag{4}$$

由于给定时刻的太阳直射方向是确定的,当太阳方向、小波面法线方向和探测器视线方向三者之间满足镜面反射条件时,探测器可以接收到小波面反射的太阳直射辐射,从而观测到海面反射太阳辐射形成的高亮区域。

太阳散射辐射可以并入天空辐射。由于天空背景辐射来自各个方向,若要精确计算海面对天空背景辐射的反射,需要计算海面对每一个入射方向天空背景辐射的反射,然后对入射角和入射方位角进行积分,这样计算量会很大。为了简化问题,可用 45°入射的背景辐射代替整个天空背景辐射[10],从而极大地减小计算量。

2.2 基于 GPU 的红外辐射计算模型

海面由大量的小波面构成,基于海面红外辐射亮度模型计算得到一个小波面的红外辐射亮度,迭代计算所有小波面的红外辐射亮度并灰度化得到一帧海面背景红外场景。在一帧时间内计算出海面模型上所有顶点(小波面)红外辐射亮度的计算量相当可观(小波面数一般在 10^5 数量级以上)。为了提高计算效率以满足实时性要求,将红外辐射计算交给 GPU 进行,利用 GPU 的高速并行计算特性提高计算速度。

基于红外成像模型的红外辐射计算方法是一种有效的计算方法[11]。红外成像模型在现有计算机图形学的可见光光照模型(如 Phong 光照模型)基础上修改而来:增加了几何体的温度分布参数,引入了自发辐射项和探测器参数。文中对该模型进行修改,去掉探测器参数,得到如下红外成像模型:

$$L=L_{sea}(\varepsilon,T)+\rho\cdot L_e+\rho\cdot L_{sund}\cdot\max(0,\cos^n\alpha) \tag{5}$$

式中:$L_{sea}(\varepsilon,T)$为海水辐射亮度;L_e 为海面接收的天空背景辐射亮度;L_{sund} 为太阳直射辐射亮度。Max(0, $\cos^n\alpha$)项来源于 Phong 光照模型,用于模拟海面对太阳直射辐射的镜面反射效果;α 是太阳辐射反射出射方向和探测器方向的夹角;n 是高光系数 (对于海面可取100~200 之间的整数)。

3 红外海面背景场景渲染生成

3.1 离线生成海面高度场数据

通过以上叙述发现,影响海面红外仿真实时性的因素有两个:一是海面高度场数据计算和红外辐射计算;二是海面场景的三维渲染。尽管利用 2D FFT 技术提高了高度场运算效率,但计算时间仍较难满足实时性要求,而红外辐射计算和海面场景的三维渲染必须在线实时进行。因此,对于海面高度场数据的生成策略,采用文中提出的预生成离线数据技术。

首先,确定波浪最大时间周期 T,按一定的帧速生成 T 时间内需要渲染的所有海面波浪高度场数据,并保存离线数据。在线渲染时,以 T 为周期循环渲染保存的高度场数据。

其次,确定海面组件网格大小。海面组件是构成海面的基本单元,多个海面组件相接排列构成大面积海面,如图 3 所示。海面组件网格的长度或宽度(网格点数)一般为 2 的 n 次幂。结合波浪最大时间周期 T,确定所要计算生成的海面组件总数。

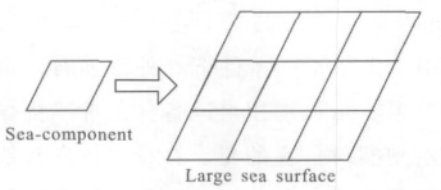

图 3 多个海面组件构成大面积海面

Fig.3 Numbers of sea-components make up the large sea surface

3.2 实时渲染海面背景场景

在实时渲染海面场景中,采用基于视点的渲染

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

技术。首先,根据视点位置、视线方向和观测视场角等参数确定可视空间区域;然后,标记可视空间与海平面相交边界构成的四边形平面,四边形内部区域为可见区域,即要渲染海面场景的区域;最后,根据确定的四边形区域,在其内部平铺海面组件。平铺效果如图4所示。当视点位置改变后,重复上述步骤,重新绘制可见区域的海面场景。

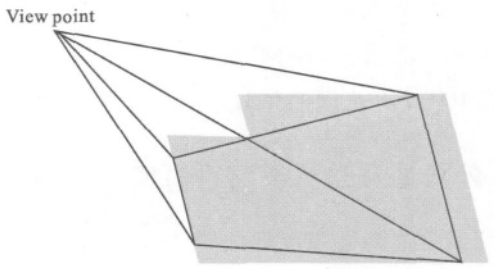

图4 基于视点渲染技术

Fig.4 View point based on rendering technique

海面场景渲染中采用基于视点的渲染技术,可以在满足视觉要求的前提下,大大减少渲染的数据量,同时,渲染数据量的减少也缩短了海面红外辐射的计算时间,提高了场景的渲染速度。

3.3 仿真结果

在多种条件下对红外海面背景的渲染速度和成像效果进行了仿真实验。其平台如下:计算机硬件资源,CPU为Core Duo E7500(2.93 GHz),内存2 GB,显卡为ATI Radeon HD 4 600 Series (512 MB)。软件开发环境:编程环境为visual studio 2005 sp1(C++),三维渲染引擎采用开源的OSG三维渲染引擎(2.8.2版)。仿真参数:海面组件FFT网格大小为64×64,海面组件大小为128 m×128 m,海面最大面积限定为50×50个海面组件,仿真波段中波设为3~5 μm,长波设为8~12 μm。

表1给出了不同条件下红外海面背景渲染帧速的实验结果。可以看出:(1)各种条件下的场景渲染速度均达到实时仿真的要求;(2)相机在直线前进模式下的场景渲染速度,远低于静止模式和水平360°扫描模式。这是由于视点在前进过程中,需要大量销毁离开视场的海面几何数据,同时生成新进入视场的海面几何数据,运算量急剧上升造成渲染帧速的下降。

表1 不同条件下红外海面背景渲染帧速

Tab.1 Rendering speed of infrared sea in different conditions

Camera scanning mode	Infrared object	Frame rate(Min-Max, FPS)
Static	sea	340-380
	sea, sky	320-380
	sea, sky, ship	220-310
360° horizontal scanning	sea	340-380
	sea, sky	320-380
	sea, sky, ship	220-310
Straight forward	sea	45-55
	sea, sky	43-50
	sea, sky, ship	39-47

图5~图7是不同波段下红外海面仿真效果截图,图8是综合了天空和海面目标的红外场景仿真的一帧画面。

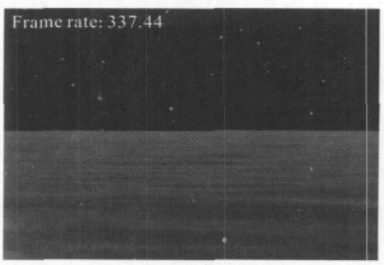

图5 3~5 μm无太阳直射反射海面红外场景

Fig.5 Infrared sea scene in 3-5 μm without sunglint

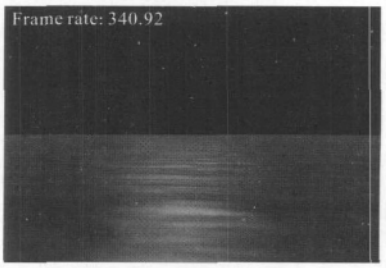

图6 3~5 μm有太阳直射反射海面红外场景

Fig.6 Infrared sea scene in 3-5 μm with sunglint

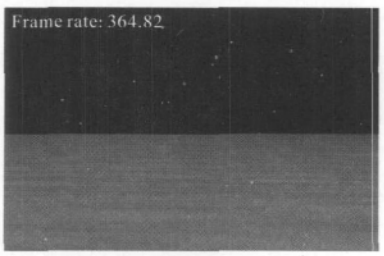

图7 8~12 μm海面红外场景

Fig.7 Infrared sea scene in 8-12 μm

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

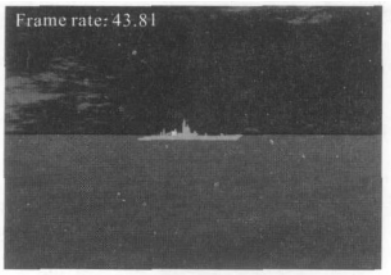

图 8 海天背景下海上目标场景

Fig.8 Infrared scene with sea, sky and ship

4 结 论

文中提出一种海面背景红外实时仿真方法,该方法引入 2D FFT 技术和 Geomipmap 技术快速计算和优化组织海面几何模型数据,使用 GPU 计算海面红外辐射, 采用预生成离线数据技术和基于视点渲染技术减少在线实时渲染和计算的数据量。仿真实验结果表明: 该方案有效并完全满足海面背景红外仿真实时性的要求。同时,为仿真系统中其他仿真部分预留出了较多计算资源。

目前,该方法还有一定的改进空间。一方面,对渲染效率进行进一步的优化, 尤其是相机直线前进模式下的渲染效率;另一方面,进一步验证该方法仿真结果的有效性。

参考文献:

[1] Li Liangchao, Wu Zhensen, Yang Ruike. Infrared images simulation system of sea-sky background [J]. ***Infrared Technology***, 2007, 29(5): 288–290. (in Chinese)
李良超,吴振森,杨瑞科. 海天背景红外成像仿真系统[J]. 红外技术, 2007, 29(5): 288–290.

[2] Ren Haixia, Ren Haigang, Xu Gao. Real-time infrared simulator of marine ship [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(2): 202–206.(in Chinese)
任海霞, 任海刚, 徐杲. 海面实时舰船红外热像仿真平台[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 202–206.

[3] Ren Haigang, Chen Hanping, Xu Gao, et al. Sea surface emissivity models in infrared image simulation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(1): 36–38. (in Chinese)
任海刚,陈汉平, 徐杲, 等. 红外仿真中的海面发射率模型[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 36–38.

[4] Xiao Weichao. Study on the sea wave rendering and simulation technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (in Chinese)
肖维超. 海浪绘制及仿真技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.

[5] Jiang Zhaoyi, Wang Xun, Ling Yun. Infrared simulation of ocean scene utilizing PC graphics hardware [C]// Proceedings of ETT & GRS, 2008, 2: 468–471.

[6] Tessendorf J. Simulating ocean water[R]. SIGGRAPH course Notes (Course 47), 2001.

[7] Polack T. Focus on 3D terrain programming[M]. USA: Premier Press, 2002: 75–104.

[8] Wilf I, Manor Y. Simulation of sea surface images in the infrared[J]. ***App Opt***, 1984, 23(18): 3174–3180.

[9] Xing Qiang, Ren Haigang, Su Ming. Studyon directional emissivity of rough sea surface [J]. ***Laser & Infrared***, 2006, 36(4): 278–281. (in Chinese)
邢强,任海刚,苏明. 漫射海面的方向发射率研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(4): 278–281.

[10] Zhao Yingjun, Xu Xiaojian. Study on the modeling of the sea background infrared radiation [C]// The 12th National Signal and Information Processing, the 6th DSP applications technology Joint Conference, 2008: 42–46. (in Chinese)
赵颖君, 许小剑. 海背景红外辐射特性建模研究[C]// 全国第十二届信号与信息处理、第六届 DSP 应用技术联合学术会议论文集, 2008: 42–46.

[11] Li Hongning, Bai Tingzhu, Cao Fengmei, et al. Infrared imaging model for scene simulation and ITS validation [J]. ***Journal of Infrared and Millimeter Wave***, 2010, 29(1): 57–62. (in Chinese)
李宏宁, 白廷柱, 曹峰梅, 等. 用于场景仿真的红外成像模型及其有效性分析[J]. 红外与毫米波报, 2010, 29(1): 57–62.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net