

6-14-2018

Key Technology of Oil Spill Visualization at Sea Surface

Changjun Zou

Key Lab of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116021, China;

Yin Yong

Key Lab of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116021, China;

Xiuwen Liu

Key Lab of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116021, China;

Feifei Wan

Key Lab of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116021, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Key Technology of Oil Spill Visualization at Sea Surface

Abstract

Abstract: An intensive study is made on the visualization method and oil equipment interaction. To solve the blind area problem and to realize the interactive of oil film, the following methods are proposed: *new visualization method based on texture projection; modeling technique of oil boom based on mass-spring model; dynamic interaction method between oil boom and oil film texture based on polygon clipping.* Real-time oil spill visualization at sea is implemented on GPU, the test results show the correctness and reliability of the methods.

Keywords

oil spill visualization at sea, texture projection, mass-spring model, polygon clipping, oil equipment interaction

Recommended Citation

Zou Changjun, Yin Yong, Liu Xiuwen, Wan Feifei. Key Technology of Oil Spill Visualization at Sea Surface[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2109-2116.

海面溢油可视化关键技术研究

邹长军, 尹勇, 刘秀文, 万飞飞

(大连海事大学 航海动态仿真和控制实验室, 大连 116021)

摘要: 针对海上溢油可视化及海上溢油交互中存在的问题进行了相关研究, 针对传统海上溢油方法中存在盲区问题, 提出了基于纹理投影技术的动态海面溢油可视化技术; 为实现基于物理方法的海上围油栏建模, 提出了基于质点弹簧模型的海上围油栏运动建模技术; 为实现更加真实的海上溢油作业交互模拟, 提出了基于多边形裁剪海上动态溢油交互技术。实现了基于 GPU 的海面溢油实时可视化方法, 证明文章提出方法的正确性和可靠性。

关键词: 海面溢油可视化; 纹理投影; 质点弹簧; 多边形裁; 溢油设备交互

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 06-2109-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806014

Key Technology of Oil Spill Visualization at Sea Surface

Zou Changjun, Yin Yong, Liu Xiuwen, Wan Feifei

(Key Lab of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116021, China)

Abstract: An intensive study is made on the visualization method and oil equipment interaction. To solve the blind area problem and to realize the interactive of oil film, the following methods are proposed: *new visualization method based on texture projection; modeling technique of oil boom based on mass-spring model; dynamic interaction method between oil boom and oil film texture based on polygon clipping.* Real-time oil spill visualization at sea is implemented on GPU, the test results show the correctness and reliability of the methods.

Keywords: oil spill visualization at sea; texture projection; mass-spring model; polygon clipping; oil equipment interaction

引言

随着世界经济对石油等相关产品依赖的升高, 海上石油运输占据着越来越重要的地位。然而, 随着船舶数量增加, 船员队伍素质并没有得到保证, 因此海上溢油事故也随之增加。在此背景下加强溢油应急人员培训和训练尤为重要。开展完整溢油应

急演练具有如下优点: 1) 可以检验溢油应急人员对自己业务的掌握情况; 2) 检查应急流程的合理性; 3) 发现应急预案潜在缺陷和不足。溢油应急演练对于提升应急预案的针对性、实用性和可操作性具有重要的作用^[1]。构建基于 VR 技术的海上溢油训练模拟系统, 可以大大提高应急人员的应急能力, 减少实际应急训练的成本。该系统的关键技术之一是“真实感海上溢油三维场景”的绘制。如何高效、逼真地再现海上溢油场景的动态可视化是一个十分有挑战性的课题。海面溢油可视化关键技术主要包括: 海面溢油可视化方法、围油栏运动建模技术、基于多边形裁剪的海上溢油交互方法、海上溢



收稿日期: 2016-08-04 修回日期: 2018-03-16;
基金项目: 863 课题(2015AA016404), 海洋公益性行业科研专项(201505017-4), 云南内河船舶操纵模拟器(云交科 2013(A)01);
作者简介: 邹长军(1987-), 男, 江西九江, 博士生, 研究方向为航海动态仿真、交通系统虚拟现实技术等。

<http://www.china-simulation.com>

• 2109 •

油数学模型等4个方面。

海上溢油可视化方面: 现有的海面溢油可视化成果中, 主要是采用基于油粒子方法和平面反射技术进行可视化。相关研究如李久松^[2]、YU feng^[3]、Reng Hong-xiang^[4]、吕憧憬^[5]、荣占东^[6]等。由于其方法是根据镜面反射原理, 将可视化对象反射到海面上。该方法原理同“水中倒影”一样, 因此该方法受到观察者的观察角度的影响。海面溢油的可视范围受到观察者的观察角度及海面背景的影响。当观察者的角度较低时, 溢油可见范围存在“盲区”。同时, 基于油粒子方法的可视化方法是将油膜进行离散。离散后的油膜无法再现完整的油膜效果, 其可视化的效果仍然不够理想。

围油栏运动建模方面: 余枫^[7]开展了围油栏运动仿真, 利用 Creator 建立了围油栏三维模型, 建立了基于包围盒的碰撞检测机制, 但是仍没有考虑围油栏的运动模型。王绪胜^[8]基于流体体积法 (Volume of Fluid VOF) 开展围油栏结构 CFD 仿真, 重点研究了不同围油栏结构拦油效果。吕憧憬^[5]建立了基于 ColDet 的海上围油栏碰撞检测技术, 但是只建立了基于几何的方式围油栏, 仍没有建立围油栏的运动模型。

海面溢油交互方面: 目前针对海上溢油交互的研究较少。现有溢油交互大都是基于油粒子的碰撞检测方法, 根据粒子所处的位置及围油栏包围盒的大小, 对油粒子进行遍历, 如余枫^[7]、吕憧憬^[5]、李久松^[2]等。基于碰撞检测的方法由于受到计算步长的限制, 当计算步长较大或粒子速度较高时, 容易出现粒子穿透包围盒的情况。

因此, 针对现有海上溢油可视化方法存在的问题, 文章提出了基于投影纹理的海面溢油可视化新方法、基于质点弹簧模型的海上围油栏运动建模技术、基于多边形裁剪的海上动态溢油交互技术, 并针对该方法出中存在问题提出了相应的解决方法。以下分别从海上溢油数学, 海面溢油可视化方法, 围油栏运动模型, 多边形裁剪方法4个方面分别进行介绍。

1 海上溢油数学模型

海上溢油研究重要内容之一就是海上溢油数学模型。海上溢油数学模型是用于计算海上溢油运输过程的数学模型, 海上溢油数学模型发展和完善的过程也是人们对海上溢油认识不断深入的过程。只有对海上溢油各个阶段进行准确的建模, 才能准确预测其行为和归宿。

溢油在海洋中的行为和归宿可分为3大类:

1) 扩展过程: 该过程是指海面油膜由于其自身的特性而导致的面积增大过程; 2) 输移过程: 该过程是指在海洋环境动力要素的作用下溢油的迁移运动, 包括水平方向漂移和扩散以及垂直方向参混、悬浮过程。3) 风化过程: 该过程是指能够引起溢油组成性质改变的所有过程, 其主要包括蒸发、溶解、乳化、光氧化、生物降解、吸附沉降、水体的混合扩散以及生物体内的代谢作用等。由于海上溢油数学模型不是本文研究的重点, 海上溢油数学模型详细可参见文献[7]。

2 基于投影纹理的海面溢油可视化方法

2.1 新方法的优点

基于纹理投影的海面溢油可视化方法可以很好的解决现有方法中的问题。由于溢油多边形在通过像素着色器进行投影变换之后, 再通过片元着色器与海面进行融合, 所以溢油与海面即融为一体, 不受观察者观察角度的影响, 不存在“盲区”。而且所有的计算都在着色器中进行, 充分利用了的图形卡的并行计算能力, 大大提升了计算的效率。另外, 基于纹理投影的方法还有比普通纹理贴图更强的适用性, 在纹理贴图中, 需要计算几何体每个顶点的纹理坐标, 对于复杂的表面往往很难实现。而投影纹理方法却不需要计算几何体表面的顶点坐标, 可以适用于多种复杂表面, 且不需要更改相关的投影代码即可实现不同表面的投影。

2.2 基于纹理投影方法海上溢油可视化方法

2.2.1 纹理投影方法简介

简单来讲纹理投影方法就类似于投影机进行投影的工作原理类似,其最重要的一点就是确定纹理坐标,纹理坐标的确定依赖于物体表面点的相对位置和投影机的位置。为了把纹理投影到一个表面上,需要根据表面点的位置和投影源来确定纹理坐标。可以把投影源作为一个摄像机,位于场景的某处,就像 OpenGL 中定义一个摄像机一样,该投影坐标系统的中心点位于投影源所在的位置,视图矩阵 M_{view} 将坐标转化到投影坐标系,透视投影矩阵 M_{proj} 将视景物转换为一个大小为 2 的视景物,其中心点位于投影坐标系的原点。但由于规格化的投影空间是 $[-1, 1]$,而纹理坐标是 $[0, 1]$,因此需要把这个视景物转化到 $[0, 1]$ 中,可以先把其缩小 $1/2$,然后再平移 $1/2$,这样就转化到了 $[0, 1]$ 上。如式(1)所示。得到了下面的变换矩阵:

$$M_{world} = P \cdot \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot M_{proj} \cdot M_{view} \quad (1)$$

式(1)中: M_{world} 是需要计算的世界坐标系下的纹理坐标, P 是局部坐标系下纹理坐标, M_{proj} 是投影矩阵, M_{view} 是视图矩阵。

从上述过程可以看出,该方法首先对纹理坐标进行投影变换,然后再进行视图变换,最后得到世界空间中纹理的实际坐标,然后在片元着色器中根据该坐标与实际的背景进行融合,得到融合之后的效果。另外,由于该方法是在片元着色器中进行融合,融合之后的效果更加自然,实现方式更简单。

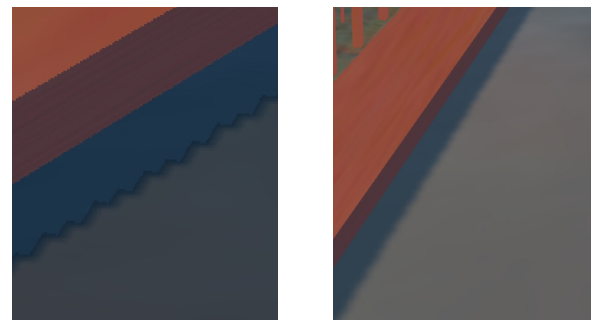
由于以往的纹理贴图方式需要先计算各个定点的纹理坐标,然后根据计算的纹理坐标进行贴图,而本文提出的该方法则不需要计算顶点的纹理坐标,该算法三维模型无关,具有通用性。

2.2.2 基于高斯平滑滤波的边缘锯齿效果的改善

由于纹理投影的方法是将溢油多边形映射为

纹理,而纹理的分辨率是有限的,这就导致纹理的可视化效果受到纹理像素分辨率的影响。如果分辨率较低时,边缘会出现明显的锯齿现象。为此本文采用了高斯平滑滤波方法^[9]进行纹理的平滑滤波,改善边缘的锯齿效应。高斯滤波就是对整幅图像进行加权平均的过程,每一个像素点的值,都由其本身和邻域内的其他像素值经过加权平均后得到。高斯滤波的具体操作是:用一个如式(2)的模板扫描图像中的每一个像素,用模板确定的邻域内像素的加权平均灰度值去替代模板中心像素点的值。由图 1(a)~(b)可见,采用高斯平滑滤波方法进行纹理的平滑滤波后,边缘的锯齿效应大大改善。

$$kernel = \frac{1}{16} \times \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$



(a) 未采用高斯滤波

(b) 采用高斯滤波

图 1 用高斯滤波前后对比

Fig. 1 Comparison before and after gauss filtering

2.3 海面溢油可视化方法的实现

基于纹理投影方法的海面溢油可视化的流程如图 2 所示。

首先根据溢油模型计算溢油多边形各定点坐标,并将计算后的溢油多边形进行(Rendering to Texture, RTT)纹理烘焙^[10]生成溢油多边形的纹理,将该纹理进行投影变换得到世界坐标系下投影变换后的纹理坐标,在片元着色器中进行融合,最后输出渲染效果。像素融合的公式如式(3):

$$T_{out} = \alpha T_{bk} + (1 - \alpha) T_{oil} \quad (3)$$

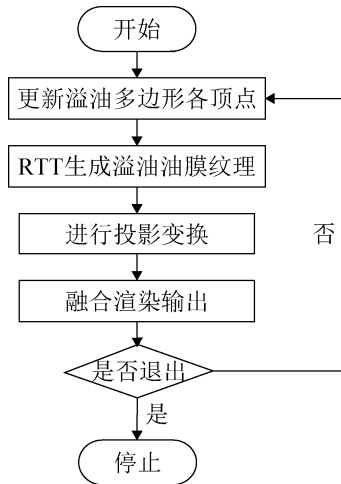


图2 纹理投影流程图

Fig. 2 Texture projection flow chart

式(3)中 α 为背景所占的比重。图3是海面油膜纹理投影融合之前和融合之后的效果图。图4(a)为基于纹理投影方法应用于复杂表面的效果;图4(b)为不同海况情况下海面和油膜的融合效果。由图4可以看出,基于纹理投影的方法对于复杂表面也具有较好的效果。在该方法中由于所有融合都在片元着色器中逐像素进行,融合效果结果更加贴合投影对象。

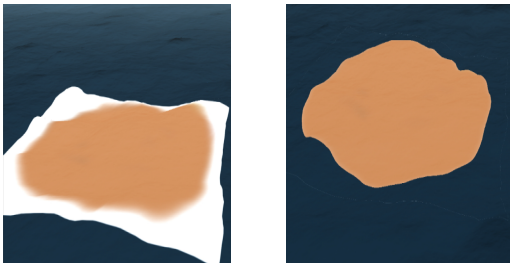


图3 油膜纹理与海面融合前后效果对比

Fig. 3 Comparison of the fusion with the sea surface before and after

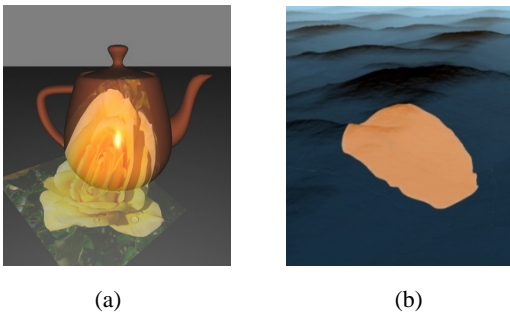


图4 复杂表面投影

Fig. 4 Projection on complex surface

3 围油栏运动控制模型

3.1 质点弹簧模型

文章提出了基于物理方法的围油栏运动建模技术。实现了质点弹簧模型的围油栏实时仿真。采用 Provot^[11]提出的经典质点-弹簧模型,认为围油栏的密度和厚度是均匀的,将围油栏离散成的质点,每个质点的质量和物理机械性能均相同。在质点-弹簧模型中,每一个粒子质点与两端粒子质点通过弹簧相连,这些弹簧保证了仿真效果的真实性和^[12]。每个质点粒子在横向通过结构弹簧相连,在受到拉力时,围油栏通过弹簧传递拉力和压力。如式(4)所示,弹簧的形变通常可视作线性弹性变化,并遵守胡克定律。对于质点*i*,连接质点*j*的弹簧产生的作用力为:

$$F_{si} = K_s (|x_{ij}| - l_{ij}) x_{ij} / |x_{ij}| \quad (4)$$

式中: $x_{ij}=x_i-x_j$ 为质点*i*和质点*j*之间位置差异向量; K_s 为弹性系数; l_{ij} 为质点*i*和质点*j*之间的初始位移差。此外为了降低弹簧由于受到拉力发生震荡,为此增加了阻尼器,该模型由两部分组成:分别为弹簧和阻尼器,阻尼力的计算公式为:

$$F_{ds} = K_d (v_j - v_i) \quad (5)$$

式(5)中: K_d 为弹簧阻尼系数, v_i 和 v_j 分别为质点*i*和*j*的速度向量。在使用时,可以通过调节阻尼系数参数抑制震荡现象的发生。如图5所示为围油栏不同时刻拖带效果,与真实围油栏相比可以看出,仿真结果具有较高的逼真程度。

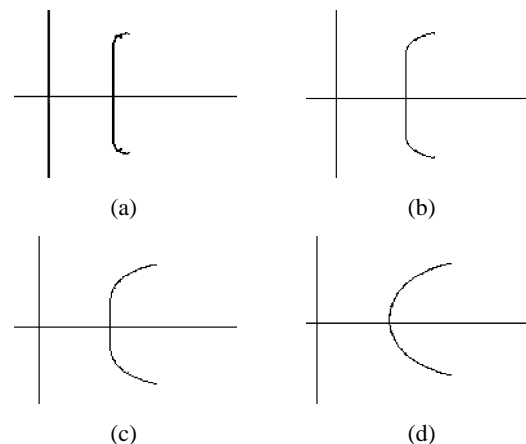


图5 围油栏运动序列

Fig. 5 Sequence of oil boom

3.2 与真实围油栏对比

与真实围油栏对比: 为了对比文章建立的围油栏运动模型的效果, 搭建了基于 OSG 的三维视景驱动平台, 采用结构化面向对象的方法设计了围油栏的驱动平台。该代码由于采用面向对象的设计, 能够被重复利用, 增加代码的可用性, 能够方便进行移植。可视化效果如图 6(b)所示。



(a) 真实围油栏效果 (b) 模拟围油栏效果

图6 真实围油栏与模拟效果对比

Fig. 6 Comparison of oil boom between the real one and the simulation

图 6(a)~(b)是真实围油栏与模拟效果对比, 其中(a)是真实围油栏照片; (b)是模拟的两条拖轮进行围油栏拖带作业。从图中可以看出, 模拟效果与真实围油栏效果比较接近, 可以反应海上围油栏在拖带过程中的弯曲现象, 验证了文章建立的围油栏运动模型的合理性。

除此之外, 还建立了海上围油栏与海上溢油的交互模块, 通过采用多边形裁剪算法^[13], 实现了围油栏围油效果。

4 基于多边形裁剪的溢油交互模型

4.1 海面溢油交互流程

为了实现海面溢油与溢油应急设备的交互效果, 文章采用了基于多边形裁剪技术的交互方式。通过采用溢油应急设备轮廓构建裁剪包围盒(裁剪多边形), 通过将该包围盒与海面溢油多边形(被裁剪多边形)进行裁剪, 实现海面溢油的动态交互效果。

溢油交互主要步骤如下:

- 1) 通过溢油模型更新溢油多边形;
- 2) 通过围油栏运动模型更新裁剪多边形;

- 3) 执行多边形裁剪。

通过采用 Vatti^[14]算法, 实现高效多边形裁剪, 达到实时交互的目的。

4.2 多边形裁剪算法介绍

Vatti 算法介绍: 在图形系统中, 二维裁剪是最为基础、最为常用的操作之一。对裁剪算法的研究主要集中在在线段裁剪和多边形裁剪两方面。在使用中, 多边形裁剪与线段裁剪相比具有更高的使用率, 因此它是目前裁剪研究的主要课题。多边形裁剪中用于裁剪的多边形称为窗口多边形(裁剪多边形), 被裁剪的多边形称为实体多边形(被裁剪多边形)。多边形愈复杂, 其裁剪算法就愈难以实现。现有的解决方案或者局限于某一类多边形, 或者结构复杂、时间消耗大。在这类算法中只有 Weiler 算法^[15], Vatti 算法及 Greiner-Hormann 算法^[16]可以在合理的时间内处理一般的情况。其中, Weiler 算法使用的是树形数据结构, 而 Vatti 算法和 Greiner-Hormann 算法使用的是双线性链表数据结构, 后两者在复杂性及运行速度方面都优于前者^[17]。

Vatti 算法可以在合理的时间内处理一般的情况, Vatti 算法使用的是双线性链表数据结构, 具有较低的算法复杂性和较高的运行速度, 故文章采用基于该算法的多边形的裁剪技术。

多边形裁剪算法步骤如下:

- 1) 计算两个多边形图层交点。
- 2) 针对多边形顶点和图层交点, 对其按纵坐标进行排序。
- 3) 根据纵坐标建立扫面线, 将主多边形和窗口多边形层分别进行分割, 得到两个梯形集合。
- 4) 在各扫描带上建立“交梯形”集合。
- 5) 在“交梯形”集合的基础上通过边界追踪等方法构建裁剪多边形并输出计算结果。

算法测试:

图 7 模拟了不同时刻围油栏裁剪溢油多边形效果。图中围油栏运动模型是采用第 3 节技术。左边部分为二维效果, 右边部分为三维渲染效果。

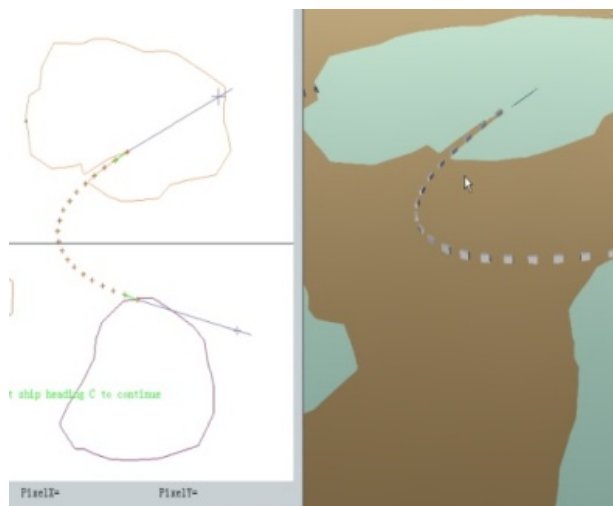


图 7 围油栏剪测试效果测试
Fig. 7 Clipping test of the oil boom

测试中实现了二维三维联动,通过共享内存进行数据传输,保证数据的一致性。在该测试中,左图中多边形表示溢油油块,弧形节点代表围油栏,十字表示拖轮,十字中矢量线段表示拖轮前进的方向和速度大小,拖轮前进速度和方向可以通过键盘进行控制,方便进行测试。通过围油栏与溢油油块

的交互实现算法测试功能。结果显示,随着拖轮的前进,围油栏也随之前进,体现了围油栏与拖轮的交互。同时随着围油栏经过溢油油块,相应裁剪算法被触发,体现了围油栏与海面溢油的交互。在该测试中运行帧率均保持在 65 帧以上,也体现了裁剪算法的高效性。

5 应用案例

论文提出的溢油可视化方法、基于质点弹簧模型的围油栏建模技术和基于多边形裁剪技术的溢油交互技术已经成功应用于作者开发的基于 VR 技术的海上溢油应急训练系统。

5.1 基于 VR 技术的海上溢油应急训练系统的组成

海上溢油应急训练系统主要由两大模块组成:溢油应急演练导演台和溢油应急演练操作单元,系统通过局域网连接,系统模块框图见图 8。

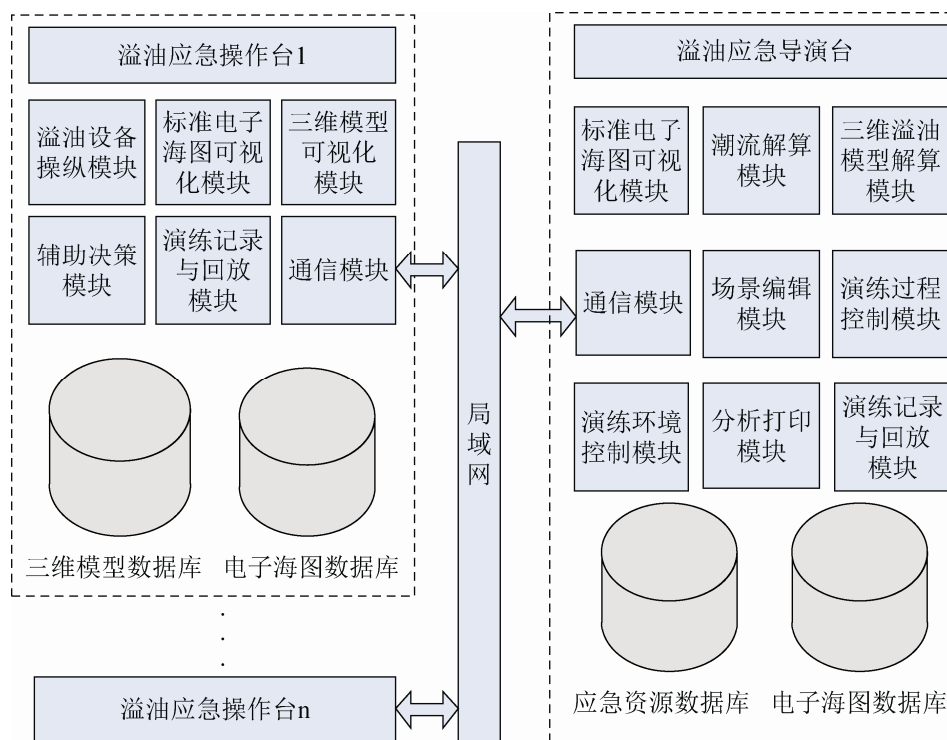


图 8 系统组成
Fig. 8 System composition

5.2 硬件平台及测试结果

硬件平台: Core2 处理器, GT430 显卡, DDR3 内存 2 GB。

操作系统: Windows 7 操作系统。

场景三维模型大小: 464 MB。

三维渲染采用 OSG(Open Scene Graph)渲染引擎^[10]。

帧率: 48 帧

如图 9 所示, 案例模拟两条船舶拖带围油栏进行围油作业, 围油栏长度为 200 m, 拖带速度为 4 节, 运行帧率为 48 帧以上。图中模拟两条拖轮拖带围油栏拖带作业效果。图中围油栏各节点均实现了拖带交互, 可以模拟单船、双船及多船拖带作业。可以通过二维交互界面实现对围油栏进行编辑, 可以进行围油栏节点的拖带连接, 连接节点的更换, 围油栏类型的更换等交互操作。

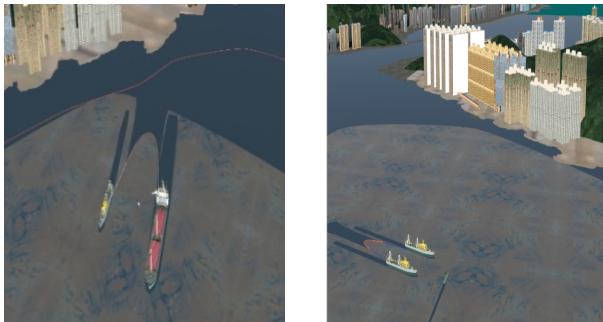


图9 溢油可视化效果图

Fig. 9 Visualization result of oil film projection

6 结论

文章对现有的海面溢油可视化等方法进行总结, 针对现有海面溢油可视化方法中存在盲区问题以及不能很好体现不同油膜纹理效果等问题, 提出了基于纹理投影技术的面溢油可视化新方法, 解决了传统海面溢油可视化方法存在的多个问题。该方法不仅能够适用于不同的静态复杂表面, 还适用于复杂的动态表面, 因此具有很强的适用范围。针对不同的表面进行投影测试, 取得了良好的可视化效果, 具有较高的运行帧率。

同时为了实现海上溢油应急交互过程, 提出了基于质点弹簧模型的围油拦运动模型, 不仅实现了围油拦拖带运动过程的仿真, 还实现了基于多边形裁剪技术的面溢油交互模型, 取得了良好的可视化效果。该方法已成功应用于“溢油应急三维演练系统”项目中, 证明该方法是高效性和可靠性。

参考文献:

- [1] Xuan Chen, Feng Yu, Chang Junzou, et al. Research of 3D Oil Spill Response Drill System[J]. Aquatic Procedia (S2214-241X), 2015, 3: 15-20.
- [2] 李久松. 基于 i4Ocean 平台的海上溢油动态可视化与应急决策支持系统的研究与设计[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Li J S. The research and design of marine oil-spill dynamic visualization and emergency decision supporting system based on the i4Ocean Platform[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [3] Feng Yu, Yong Yin. Simulation and 3D Visualization of Oil Spill on the Sea[C]// IEEE International Symposium on Virtual Reality Innovation 2011. Singapore, Singapore, 2011: 213-216.
- [4] Ren Hongxiang, Zhang Xinyu, Yin Yong. 3D Real-Time Rendering of Continuous Oil Spill on Simulated Ocean[J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(19): 5117-5120.
- [5] 吕憧憬, 田丰林, 李勃, 等. 海上溢油可视化信息系统的设计与实现[J]. 地理空间信息 (S1672-4623), 2012, 10(5): 21-26.
Lv ChongJing, Tian FengLin, Li Bo ,et al. Design and implementation of the visual information system for offshore oil spill[J]. Geospatial information (S1672-4623), 2012, 10(5):21-26.
- [6] 荣占东. 海洋溢油模拟信息系统的设计与实现[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Rong Zhandong. Design and implementation of marine oil spill simulation information system[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [7] 余枫. 海上搜救模拟器中近海溢油的实时仿真与可视化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
Yu Feng. Study on the Real-time simulation and visualization of offshore oil spill in marine search and rescue simulator[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010.
- [8] 王绪胜. 某新型结构围油栏的数值模拟分析[J]. 中国高新技术企业, 2011, 19(3): 39-40.

- Xusheng Wang. Numerical simulation and analysis of a new structure of oil boom[J]. China High Technology Enterprises (S1009-2374), 2011, 19(3): 39-40.
- [9] 李雪威, 张新荣. 保持边缘的高斯平滑滤波算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(1): 83-85.
- Xuewei Li, Xinrong Zhang. On edge-preserved gaussian smoothing filtering algorithm. Computer application and software, 2010, 27(1): 83-85.
- [10] Rui Wang, Qian Xuelei. OpenSceneGraph 3 Cookbook[M]. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2012.
- [11] PROVOT X. Deformation constraints in a mass- spring model to describe rigid cloth behavior[C]//Canadian Information Processing Society. Canada, 1995: 147.
- [12] YUAN Bin, DU Hong-wang, WANG Hai-tao, et al. The simulation of cable harness based on mass-spring model[C]// Web of Conferences MATEC 31, 2015: 1-5.
- [13] DIMRI S C. A Simple and Efficient Algorithm for Line and Polygon Clipping in 2-D Computer Graphics[J]. International Journal of Computer Applications (S0975-8887), 2015, 127(3): 31-35.
- [14] VATTI B R. A generic solution to polygon clipping[M]. Communications of the ACM, 1992, 35(7): 56-63.
- [15] WEILER K, ATHERTON P. Hidden surface removal using polygon area sorting[M]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1977: 214-222.
- [16] GREINER G, HORMANN K. Efficient clipping of arbitrary polygons[M]. ACM Transactions on Graphics, 1998: 71-83.
- [17] 王结臣, 沈定涛, 陈焱明, 等. 一种有效的复杂多边形裁剪算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 3(2): 369-372.
- Jiechen Wang, Dingtao Shen, Yanming Chen, et al. An efficient algorithm for complex polygon clipping [J]. Geomatics and information science of wuhan university, 2010, 3(2): 369-372.

(上接第 2108 页)

- [11] 蔡宇浩, 梁永全, 樊建聪, 等. 加权局部方差优化初始簇中心的 K-means 算法[J]. 计算机科学与探索, 2016, 10(5): 732-741.
- Cai Y H, Liang Y Q, Fan J C, et al. Optimizing Initial Cluster Centroidss by Weighted Local Variance in K-means Algorithm[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2016, 10(5): 732-741.
- [12] Newman M E, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics (S1539-3755), 2004, 69(2 Pt 2): 026113.
- [13] Clauset A, Newman M E, Moore C. Finding community structure in very large networks[J]. Physical Review E (S2470-0045), 2010, 70(6 Pt 2): 264-277.
- [14] Brin S, Page L. The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine[J]. Computer Networks and ISDN Systems (S0169-7552), 1998, 30: 107-117.
- [15] 董骥瑞. k-均值聚类算法的改进与实现[D]. 吉林: 吉林大学软件学院, 2015: 43-46.
- Dong Q R. Improvements and Implementation of k-means Clustering Algorithm[D]. Jilin: School of Software, Jilin University, 2015: 43-46.