

基于 OSG 的 MCSEM 施工 实时监测方法

王 诏¹, 刘 展², 安聪荣², 张雪峰³, 魏合龙¹, 孙记红¹, 苏国辉¹

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 2 中国石油大学(华东)地球科学与
技术学院, 青岛 266580; 3 中国兵器工业计算机应用技术研究所, 北京 10089)

摘 要: 三维实时 MCSEM 监测系统强调的是监测的实时性, 以三维可视化方式实时显示施工过程, 有利于直观地监测和判断工作过程是否存在异常。根据 MCSEM 作业方式与流程, 研究了在 OSG 三维渲染引擎的开发环境下, 三维场景实时动态更新方法, 包括三维模型实时更新、海底地形、轨迹线等要素绘制和相机实时跟踪; 研究了三维场景数据组织结构与渲染状态机制, 优化场景渲染, 提高场景的响应速率, 尽量保证三维显示的实时性、流畅性; 开发了三维实时 MCSEM 监测系统实例验证, 经过大量数据多次测试, 系统运行稳定、响应及时, 三维显示效果良好, 较好地满足了实时监测的要求。

关键词: OSG; 三维实时监测; MCSEM; 渲染优化

中图分类号: TP277.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2018.03008

MCSEM (海洋可控源海洋电磁法, Marine Controlled-Source Electromagnetic Methods) 是一种海上石油勘探技术, 20 世纪 70 年代人们开始了 CSEM 的初步研究, 随着国际上对其研究和应用的日趋成熟^[1-5], 它逐渐发展成为海上综合勘探技术中不可或缺的一部分。MCSEM 工作区域主体在海下, 由于海下可视性差, 人们无法观察到采集站、发射机的投放、工作情况和回收, 比如采集站投放位置是否与规划位置相符, 发射机工作过程中是否存在安全问题, 采集站回收过程是否出现异常等等。因此, 开发出一款针对 MCSEM 施工的三维实时监测系统, 使海上作业数字化、实时可视化、智能化, 就显得尤为重要。OSG (OpenSceneGraph) 是一种基于 OpenGL 的、高性

能的开源三维图形引擎, 可以运行在 Windows、Mac OS X 和大多数类型的 UNIX 和 Linux 操作系统上, 具备跨平台性, 它封装了数量众多的提升程序运行机制的算法、动态数据分页机制, 以及提供其他语言 (包括 Python、C#、Java) 的封装支持^[6]。经过十几年的发展, 其在海洋领域应用较为成熟, 如杜俊贤^[7]的基于 OSG 的虚拟场景中运动控制与交互技术研究; 如赵敬红^[8]基于 OpenSceneGraph 的大地形可视化方法研究; 吕庆伦^[9]的基于 OSG 的船舶驾驶系统视觉仿真研究; 李新放等^[10]的基于 OpenSceneGraph 的海洋环境三维可视化系统研究等。通过调查海洋 CSEM 作业环境与流程, 设计研究适合于该工作的三维实时监测系统。

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41471322); 中国地质调查局二级项目 (DD20160157)

作者简介: 王 诏 (1991—), 女, 硕士, 主要从事数字油田关键技术方面的工作。E-mail: hdszw01@163.com

1 MCSEM 工作流程

MCSEM 是一种海洋地磁勘探方法, 该系统主要由两大硬件组成: 大功率海洋可控源电磁发

射机(简称发射机)和海底混场源电磁采集站(简称采集站)。作业原理如图1所示。发射机作为海底的人工激励场源,通过发射电极向海水中发送0.1~10 Hz的大功率电磁脉冲,采集站采集海底介质返回的天然场源和人工场源电磁信号,通过对电磁信号进行反演解释,可获得比海洋大地电磁法更加清晰的海底介质电性成像^[11]。其作业流程主要概括为5个部分。

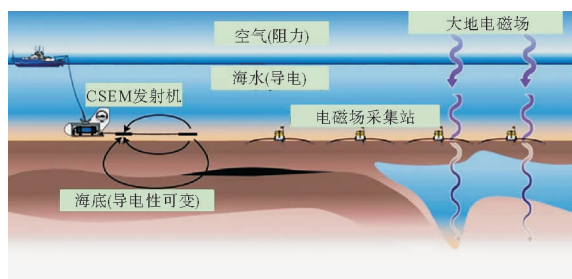


图1 MCSEM 工作原理

Fig. 1 Working principle diagram of MCSEM

(1)前期测区测线规划 通过事先规划测区和测线,确定采集站的投放位置,为采集站的布置提供指导。

(2)采集站投放 实际布置采集站时,以测区测线规划图为指导,以测线为工作单位,逐个地投放采集站,使其尽可能落到采集站的规划位置。

(3)发射机投放 布置完采集站后,船航行到适当位置,用绞车缓慢下发射机,规定发射机距离海底50 m。

(4)发射机开始工作 在发射机正式工作时,其工作模式是采用船载可移动水平电偶极子源和置于海底的阵列电磁接收器接收来自海底地层的电磁场信号,通过对接收电磁场信号的处理解释得到地下地层的电阻率分布。

(5)采集站、发射机回收 先用绞车收线缓慢回收发射机,然后释放所有的采集站,采集站释放后,因为浮力作用会上升至海面,然后一一回收海面上漂浮的采集站。

三维实时 MCSEM 监测系统(下文简称为“监测系统”)主要是实现实时地监测海洋可控源海上施工作业全过程,以便直观、及时地判断作业是否出现异常。

2 总体设计

将 MCSEM 可视化监控系统划分为3个功能模块,分别为数据传输功能模块、操作控制功能模块和海洋三维环境窗口功能模块,如图2所示。

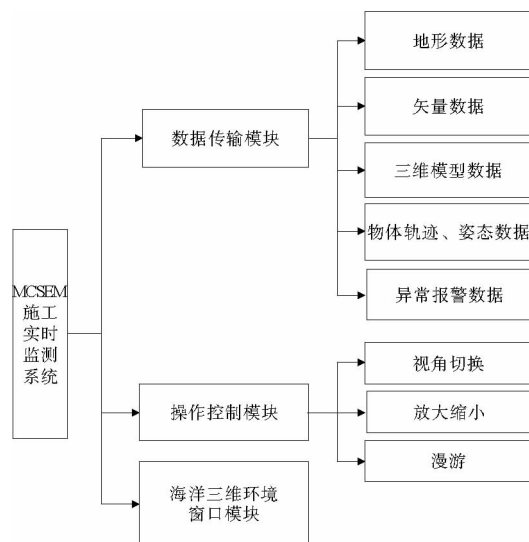


图2 软件系统框架设计图

Fig. 2 Design of software system framework

(1)数据传输功能模块 数据传输功能模块用来导入与监控环境、监控对象有关的数据。“监控系统”的数据来源由2部分组成:采用通信技术从相关数据采集设备获取的动态数据和从本地获取的静态数据。

(2)操作控制功能模块 用来实现人机交互功能,达到控制三维窗口显示的目的。主要功能有视角切换、漫游、放大缩小。

(3)海洋三维窗口功能模块 海洋三维窗口功能模块主要为观测 MCSEM 工作提供一个海洋环境观察窗口。具体来说,包含3个部分:①提供海洋环境初始化功能;②在发射机开始工作时,以监测船体轨迹和发射机工作为主,三维场景的观察视点随着发射机的移动而适当移动,使发射机处于观测的有利位置;③在发射机和采集站投放、回收时,主要显示接收机、发射机的位置变化,由于其投放、回收位置的显示要尽可能清晰准确,故三维场景的观察视点要随着被观察物一同变化,使被观察物始终处于清楚的观测位置,由于海

底地形起伏较平缓,在观察物接近海底时,对海底地形进行尺度矩阵变换,准确显示观察物与地形的相对关系。

由于“监测系统”强调 MCSEM 作业流程显示的实时性,但对 MCSEM 施工监测,存在实际作业区域广、三维模拟数据量大、甲板监测环境恶劣等情况。又由于三维场景的更新速度受场景的大小和复杂性影响,复杂的组织和模型渲染工作会大大增加平台的实时绘制工作量,从而影响平台性能。因此,为实现实时监测,需要着重研究三维场景的实时更新方法和场景渲染优化方案,以提高场景的实时响应性能,保证场景的实时动态更新。

3 关键技术研究

3.1 实时三维场景方法研究

为达到实时监控的目的,不仅需要保证同步获取数据,而且需要根据数据在三维场景中做出相应的同步响应。那么场景如何响应呢? OSG 中的回调机制适用于场景动态更新,内容包括人机交互事件的创建与传递、数据的动态加载与处理,以及自定义的更新操作的执行等等。OSG 的仿真循环单位为帧^[12],决定每帧运行时间的主要因素是计算机的性能,配置较好的计算机可以达到 100~200 帧/s 的速率,而通常仿真程序顺利运行的最低帧速在 15~25 帧/s 即可。在每一帧时间中都会执行 eventTraversal 函数和 updateTraversal 函数,遍历所有的事件回调和更新回调,通过执行鼠标事件、键盘事件或节点回调的操作代码,使场景做出相应事件响应,实现场景的更新、拣选和绘制。

“监测系统”三维场景内容主要包括三维模型实时更新、动态要素实时绘制和相机实时跟踪。

3.1.1 动态模型实时更新

在 MCSEM 施工作业中,主要监测对象为船、发射机和采集站,主要监测其位置的实时变化。对于船,监测其航行轨迹,判断其是否在预定航线上行驶;对于发射机,规定发射机距离海底 50 m,监测其在投放、工作、回收 3 个过程中,判断发射机距海底距离是否>50 m,若不满足要求,“监测系统”及时报警提醒;对于采集站,监测

其投放和回收过程,投放过程中,判断每个采集站是否投放到前期规划的位置,回收过程中,判断其是否安全漂浮到海面。

“监测系统”中所需的实时数据由相关设备现场实时采集,采用基于 TCP/IP 协议的通信技术^[13]传递数据,表 1 为数据传递的通信协议。在 OSG 中,每个模型由一个节点管理,对于三维模型位置姿态的实时更新,主要采用节点回调方法,为每一个三维模型创建一个回调实例。在应用程

表 1 海洋 CSEM 监测系统通信协议

Table 1 MCSEM monitoring system communication protocol

示例	33#2015/7/31/12:10:30#655.5#13.3#15.5#400#0.01#17.5#441#23#24#26#455.6#665#23#34.6#1450#11100.78#23580.45#389.89#100#3.4#25#RUN#STOP#2#1KHz#3.....#CHE##END#	
	2015/7/31/12:10:30	记录时间
	655.5	发射机输出电流/A
	13.3	发射机输出电压/V
	15.5	发射机输入电流/A
	400	发射机输入电压/V
	0.01	发射机输出电流频率/Hz
	17.5	甲板电源输出电流/A
	411	甲板电源输出电压/V
	23	发射机变压器温度/℃
	24	发射机 IGBT 温度/℃
	26	发射机舱内温度/℃
	455.6	发射机所在离底高度/m
	665	发射机所在海水深度/m
	23	海水温度/℃
	34.6	海水盐度
	1450	海水声速/(m/s)
	11100.78	发射机拖体 A 的 X 坐标()
	23580.45	发射机拖体 A 的 Y 坐标()
	389.89	发射机拖体 A 的 Z 坐标()
	100	绞车放缆长度/m
	3.4	绞车放缆速度/(m/s)
	25	绞车缆线张力/N
	RUN	绞车运行状态(RUN、STOP、SET、POWER)
	STOP	发射机运行状态(RUN、STOP、SET、POWER)
	2	发射机故障事件(1,2,3)
	1kHz	数据采集卡采样率(100Hz、1kHz、2kHz、5kHz)
	3	发射波形代码(1,2,3...,255)
	...	...
	...	...
	...	...
	CHE	校验位
	#END#	数据包尾

序中创建回调的步骤如下。

(1)编写继承自基类 `osg::NodeCallback` 的新类,在新类中定义静态成员变量,用于获取通信实时传递的相关数据;

(2)重载 `operator()` 方法,编写操作代码,实现三维模型的实时动态更新;

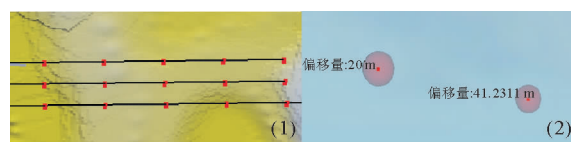
(3)初始化一个回调实例,关联相应对象。

3.1.2 动态要素实时绘制

“监测系统”在显示船、发射机、采集站三维模型位置、姿态变化时,同时绘制相关几何要素,辅助记录显示相关信息,包括海底地形、异常提示线、拖缆、前期规划的测线、前期规划的测点、前期规划的测点缓存区、空间坐标轴以及船和发射机的轨迹线。“监测系统”中的几何要素包含静态几何要素和动态几何要素。静态几何要素是场景初始化的一部分,从场景开始至结束,该几何要素形状、大小、位置不发生变化,如测线、测点、测点缓存区。动态几何要素是在场景运行时,随着相关数据变化而变化,需要实时绘制,如异常提示线、拖缆、海底地形、空间坐标轴以及船和发射机的轨迹线。

在很多三维场景中,经常可以看到相当复杂的场景,但不管场景有多复杂,其都是由少数基本图元元素组合构建而成,OSG 中的 `osg::PrimitiveSet` 类松散封装了 OpenGL 的绘图基元,常用的包括点、线、三角形、四边形、多边形。对于基本几何体的绘制和渲染,采用几何体类 `osg::Geometry`,主要步骤包括 3 步:①创建各种向量数据,如顶点、纹理坐标、颜色和发现等;②实例化一个几何体对象(`osg::Geometry`,设置顶点坐标数组、纹理坐标数组、颜色数组、法线数组、绑定方式及数据解析(确定渲染几何体的方式,`addPrimitiveSet(PrimitiveSet * PrimitiveSet)`);③加入叶节点(`osg::Geode`)绘制并渲染。

本研究的测线、测点的绘制均采用 `osg::Geometry` 类进行绘制和渲染。在绘制测点缓存区时,由于在三维场景中,缓存区为一个三维体,在 OSG 中,为了简化场景绘制,预定义了一些常用的几何体,包括正方体、太空舱、椎体、柱体、高度图、无限平面、球体和三角片。实际应用中,采用 `osg::ShapeDrawable` 类来实现内嵌几何体的绘制和渲染(图 3)。



(1)测线测点绘制效果图 (2)三维球体缓存区绘制效果图

图 3 测线测点和三维球体缓存区绘制效果图

Fig. 3 Drawing effect map of line measuring point and 3D sphere caching area

在 OSG 中,动态要素的实时绘制主要通过 `osg::Drawable::DrawCallback` 类来实现,该类用于回调绘制,每一帧时间中都执行图元重绘,对几何体对象设置回调绘制,实现几何体绘制渲染的动态更新,例如:

```
osg::ref_ptr<osg::Geometry> geometry
= new osg::Geometry;
geometry->setUseDisplayList(false);
geometry->setDrawCallback(new darw-
Callback);
```

切记把显示列表(DisplayList)设置为“false”,否则 DrawCallback 的 drawImplementation()函数(该函数用来控制绘制回调如何更新)只会调用一次,而不是在每帧时间内都动态更新 OpenGL 图形。darwCallback 为自定义的回调绘制类,步骤可概括为三步:

(1)编写继承自基类 `osg::Drawable::DrawCallback` 的新类,在新类中定义静态成员变量,用于获取通信实时传递的相关数据;

(2)重载 `drawImplementation()` 方法,编写操作代码,实现图元的实时动态更新;

(3)初始化一个回调实例,关联相应对象。

绘制异常提示线时,根据实时获取的发射机距海底的距离数据的大小,实时变化提示线颜色,以提醒异常与否;由于绘制拖缆的实时数据只有船的位置数据和发射机的位置数据,将这 2 个数据作为拖缆两端点数据,但在海水阻力的影响下,拖缆不可能呈直线形态,因此需要根据端点数据按不同比例插值出拖缆线,使水下拖缆形态更真实;海底地形的绘制采用的图元为四边形,效果如图 4,一般地,由于海底地形区域面积大、起伏小,用户不易观察海底地貌,通常改变 Z 轴尺度,以夸大海底地形的起伏变化,Z 轴的尺度变换系数

由用户实时自定义;由于在场景运行过程中,海底 Z 轴尺度系数可能会发生变化,空间坐标轴的绘制则根据尺度变换系数实时变化绘制;船和发射机的轨迹线根据实时获取的数据更新绘制,由于

轨迹线表达的是在一段时间内的路径,因此需要创建数组,分别保存船和发射机在工作时间段内的所有位置数据,来绘制出两模型在该时间段内的轨迹。

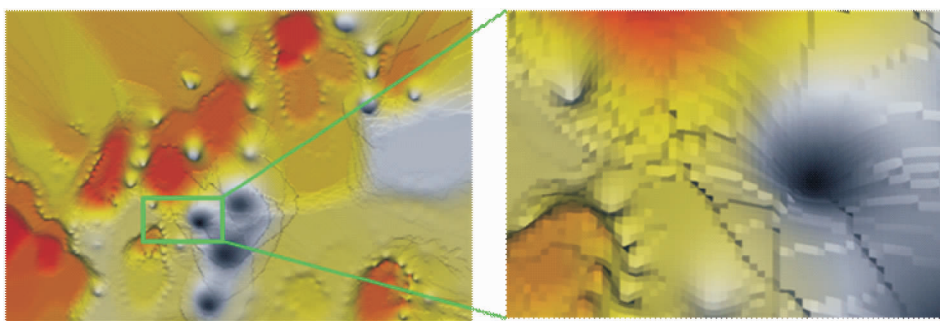


图 4 以四边形为图元的海底地形绘制效果图

Fig. 4 Map of the seabed terrain with the quadrangle as the graphic element

3.1.3 相机实时跟踪

由于 MCSEM 海上作业工区广,即海底地形区域面积大,船等三维模型尺度小,为了能清楚观察船等三维模型的位置和姿态变化,需要根据三维模型的移动适时调整相机的位置和观察方向。根据海洋 CSEM 作业模式,设计“监测系统”包含 4 种跟踪观察模式(图 5)。

(1)船跟踪模式 始终保证船在场景内,若船即将移动到场景外,则及时根据船的位置调整相机位置;

(2)发射机跟踪模式 始终保证发射机在场景内,若发射机即将移动到场景外,则及时根据发射机的位置调整相机位置;

(3)采集站跟踪模式 始终保证采集站在场景内,若船即将移动到场景外,则及时根据采集站的位置调整相机位置;

(4)全景模式 场景始终包含整个海底地形,以便于全局观察。

OSG 中可以采用键盘事件切换相机跟踪模式,主要步骤如下:

(1)编写继承自基类 `osgGA::GUIEventAdapter` 的新类,在新类中定义静态成员变量,用于获取通信实时传递的相关数据;

(2)重载 `handle()` 方法,通过 `switch(ea.getEventType())` 获取事件类型,通过 `case(osgGA::GUIEventAdapter::KEYUP)` 判断是否属于键盘事件,然后通过 `ea.getKey()` 获取键盘键

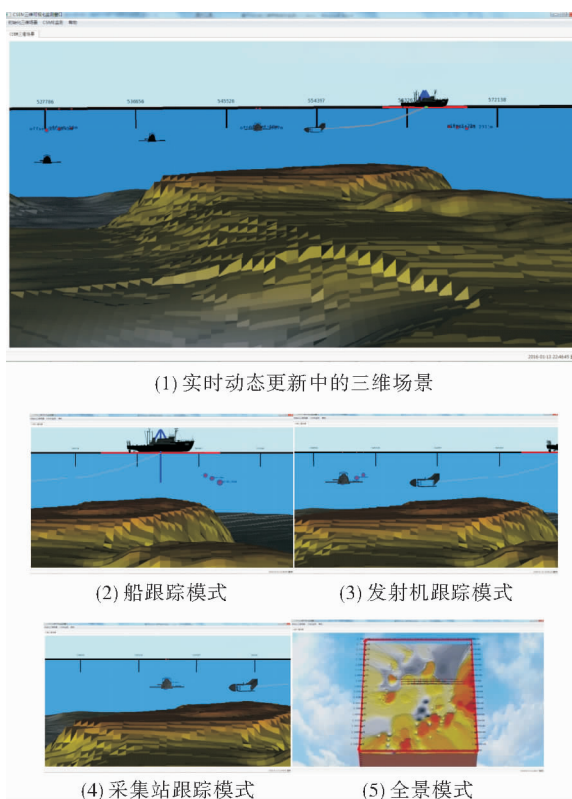


图 5 相机跟踪模式切换

Fig. 5 Camera tracking mode switching

值,用 `if` 语句判断属于哪种跟踪模式,在相应的跟踪模式中编写相应操作代码,切换跟踪模式;

(3)初始化回调实例,关联相应对象。

相机位置和观察角度的调整可以通过设置相

机节点 `osg::Camera` 的观察矩阵来确定相机的工作状态,该相机节点在设置相机观察矩阵时可以通过 2 个函数,一个是直接设置观察矩阵 `osg::Matrixd`,一个是通过 `setViewMatrixAsLookAt` 函数设置视点、中心点和视点上方向 3 个参数,然后根据这 3 个参数计算出观察矩阵。相机自动化跟踪、空间操作功能如漫游器、放大缩小、平移,本质上都是通过设置相机观察矩阵实现,基本思路是首先初始化相机节点,设置初始观察矩阵,当需要更改相机状态时,获取当前相机的当前观察矩阵,然后将该矩阵左乘旋转角度、放大缩小比例、平移单位量(在 `osg` 中这 3 个参数都以向量形式表示)进行矩阵变换,计算出新的观察矩阵,传递新的观察矩阵实现相机状态更新。

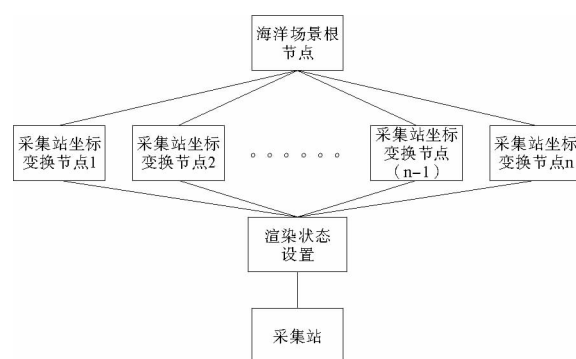
3.2 场景优化

3.2.1 三维模型复制

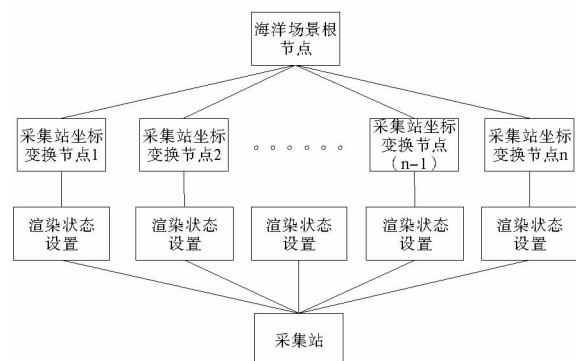
一般情况下,绘制平台反复读取模型并进行组织渲染,这样会增加绘制渲染平台工作量,影响平台性能,而“监测系统”对三维场景的实时性要求高,所以有必要进行场景优化。一次 MCSEM 海上作业投放十几个甚至更多采集站,因此通过复制三维采集站模型,使模型的读取和渲染只进行一次,能有效地减少平台的工作量。模型组织结构如图 6。

3.2.2 渲染状态管理优化

OSG 的渲染状态支持绝大部分的 OpenGL 固定功能管道渲染,如 Alpha 检验、Blending 融合、剪切平面、颜色蒙板、面拣选、深度和模板检测、雾效、点和线的光栅化,以及允许应用程序指定顶点着色和片段着色,它决定了场景中对象在屏幕上的最终位置和表现形式。在 OSG 中状态机的具体实现是 `osg::State` 类。OpenGL 程序的开发需要尽量使状态量的变化实现最小化,并尽量减少冗余状态设置和状态切换,StateSet 越少,内存的占用也越少,OSG 在一次场景图形遍历中所耗费的工作量也越少。在应用程序中,对不同场景子树做不同状态设置,由于 OpenGL 状态机制,若没有进行状态切换,已经设置的状态会一直保持,因此在进行对象绘制时,相同状态的对象排列在一起,以减少状态的切换和状态冗余指定,提高渲染效率^[14]。



(1) 非复制三维采集站模型组织结构图



(2) 复制三维采集站模型组织结构图

图 6 模型组织结构图

Fig. 6 Model organization structure diagram

状态树的产生是为了优化渲染状态的冗余指令以及频繁的状态切换所造成的效率问题,其主要组成元素为 `osgUtil` 库的 `StateGraph` 类和 `RenderLeaf` 类。`StateGraph` 可以理解为 OSG 渲染后台的组节点(Group),`RenderLeaf` 为渲染后台的叶节点,一个渲染叶对应一个场景树中的可绘制体对象。每个状态节点都包含一个子节点列表,只有最末端的状态节点会负责记录渲染叶信息^[6]。

“监测系统”中的节点树与状态树如图 7,图 7(1)中的“G”代表场景组节点“Group”,“D”代表场景中的可绘制体“Drawable”,图中同种颜色的线框表示其渲染状态相同。根据场景节点树,遍历所有节点,根据渲染状态构建状态节点,并将可绘制体数据保存到对应的渲染叶中,得到根据状态优化排序的场景状态树(2),图 7(2)中的“S”代表状态树中的状态节点“State”,“R”代表状态树中的“渲染叶”。

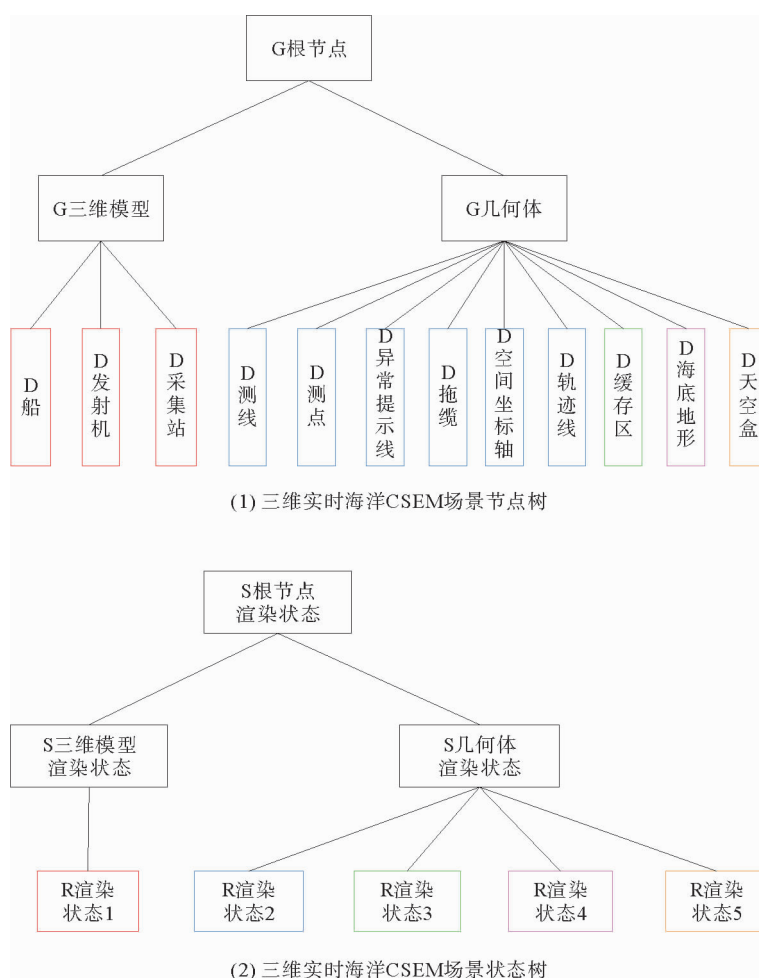


图7 节点树与状态树

Fig. 7 Node tree and state tree

4 结论

基于以上方法研究,本文开发三维实时 MC-SEM 监测系统进行了实例验证,在实时传递数据时,系统能根据数据及时响应,较好地满足了实时监控的要求;用大量数据反复进行测试,系统经过长时间工作后,仍运行稳定,显示及时,无异常冲突,验证了该研究方法的可行性;但由于数据量大,三维场景初始化速度慢。

参考文献:

- [1] 胡小群,李 斌,黄 涛. 海洋可控源电磁勘探技术[J]. 海洋石油,2012,32(3):13-17.
- [2] Avdeeva A D, Commer M, Newman G A. Hydrocarbon Reservoir Detectability Study for Marine CSEM Methods: Time-Domain versus Frequency-Domain[C]. SEG International Exposition and 77th Annual Meeting, 2007.
- [3] Weiss C. The fallacy of the "shallow-water problem" in marine CSEM exploration[J]. The Leading Edge, 2007, 72(6): A93-97.
- [4] Nordiana M M, Saad R, Saidin M, et al. The 2-D Resistivity Study of Meteorite Impact Crater at Bukit Bunuh, Perak (Malaysia) [C]// Advances in Biomedical Engineering - 2012 Asia Pacific Conference on Environmental Science and Technology (APEST 2012), 2012.
- [5] Lu X Y, Xia C S. Understand anisotropy in marine CSEM data[C]. 77th Annual International Meeting, 2007.
- [6] 王 锐,钱学雷. OpenSceneGraph 三维渲染引擎设计与实践[M]. 北京,清华大学出版社,2009.
- [7] 杜俊贤. 基于 OSG 的虚拟场景中运动控制与交互技术研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
- [8] 赵敬红. 基于 OpenSceneGraph 的大地形可视化方法研究 [D]. 长沙:中南大学,2009.

- [9] 吕庆伦. 基于 OSG 的船舶驾驶系统视觉仿真研究 [D]. 镇江:江苏科技大学,2011.
- [10] 李新放,刘海行,周 林. 基于 OpenSceneGraph 的海洋环境三维可视化系统研究[J]. 海洋科学, 2012, 36(1): 54-58.
- [11] 邓 明,王 猛,陈 凯,等. 海洋可控源电磁法原理及探测仪器[C]//2015年“海洋地质、矿山资源与环境”学术研讨会论文集. 2015:199-199.
- [12] 王 锐. 最长的一帧[CP/OL]. <http://blog.csdn.net/pizi0475/article/details/5288598>,2010.
- [13] 刘伟宇. 海洋可控源电磁甲板监测系统通信技术研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
- [14] 肖 鹏,刘更代,徐明亮. OpenSceneGraph 三维渲染引擎编程指南[M]. 北京:清华大学出版社,2010.

OSG BASED REAL TIME MONITORING METHOD FOR MCSEM SYSTEM

WANG Zhao¹, LIU Zhan², AN Congrong², ZHANG Xuefeng³,
WEI Helong¹, SUN Jihong¹, SU Guohui¹

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China; 2 School of Geosciences, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China; 3 North Institute of Computer Application, Beijing 10089, China)

Abstract: The main advantage of a 3D real-time MCSEM monitoring system is its characteristics of real-time. Displaying the construction process with 3D visualization methods in real-time contributes to avoiding abnormalities through monitoring and analyzing the work process. This paper develops a real-time dynamic update method to deal with 3D scenes. The method bases on the practices and procedures of MCSEM, and is implemented with the OSG 3D rendering engine, including the real-time updates of 3D models, the plotting of topographic features like the seabed topography and trace, and the real-time tracking of cameras. In addition, this paper contributes to the scene rendering optimization by studying the data structure and rendering mechanism of 3D scenes. The scene rendering optimization mainly results in the improvement of responding rate and the real-time and fluency of 3D display. Furthermore, an advanced 3D real-time monitoring system is implemented and further verified to meet the requirements of real-time monitoring.

Key words: OSG; real-time 3D monitoring; MCSEM; the scene rendering optimization