

8-13-2020

High-level Descriptive Simulation Model for Underwater Virtual Maintenance

Lianen Ji

College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

Ruisheng Sun

College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

Luan Qi

College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, 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 Paper 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.

High-level Descriptive Simulation Model for Underwater Virtual Maintenance

Abstract

Abstract: The virtual simulation of underwater maintenance for oil and gas production involves a variety of maintenance processes and training cases. However, the existing modeling techniques mainly focused on the description of low-level model, such as geometric and physical properties, but lacked of abstraction and description of high-level application for the *dynamic maintenance process*. So a *High-level Descriptive Simulation Model for Underwater Virtual Maintenance (HDMUM)* was proposed. Three parts of simulation model, i.e., *simulation entity, operation scene and maintenance process*, were abstracted and described from the high-level application. All of the HDMUM components and their relationship were designed to build and realize the *dynamic maintenance process*, which is the core of whole model. The application examples showed that the HDMUM can support users to build different simulation cases flexibly and efficiently.

Keywords

virtual maintenance, dynamic maintenance process, HDMUM, XML script

Recommended Citation

Ji Lianen, Sun Ruisheng, Luan Qi. High-level Descriptive Simulation Model for Underwater Virtual Maintenance[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2415-2422.

一种支持水下虚拟维修的高层仿真描述模型

纪连恩, 孙瑞生, 栾琪

(中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249)

摘要: 水下油气作业的虚拟维修仿真中涉及多种维修案例, 而现有的建模技术侧重于仿真实体及场景的几何属性和物理属性等底层模型描述, 缺乏从高层应用角度对动态作业流程进行抽象和描述。为此, 提出并建立了一种支持水下虚拟维修的高层仿真描述模型 HDMUM(A High-level Descriptive Simulation Model for Underwater Virtual Maintenance)。该模型分别对组成水下虚拟维修的三要素: 仿真实体, 作业场景和维修作业流程从高层应用的角度进行抽象和描述, 以动态维修流程为核心建立它们之间的逻辑关系, 支持用户 in 应用层灵活构建不同维修案例, 最后通过应用实例验证了模型的合理性和可行性。

关键词: 虚拟维修; 动态维修流程; HDMUM 模型; XML 脚本

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 10-2415-08

High-level Descriptive Simulation Model for Underwater Virtual Maintenance

Ji Lianen, Sun Ruisheng, Luan Qi

(College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The virtual simulation of underwater maintenance for oil and gas production involves a variety of maintenance processes and training cases. However, the existing modeling techniques mainly focused on the description of low-level model, such as geometric and physical properties, but lacked of abstraction and description of high-level application for the *dynamic maintenance process*. So a *High-level Descriptive Simulation Model for Underwater Virtual Maintenance (HDMUM)* was proposed. Three parts of simulation model, i.e., *simulation entity, operation scene and maintenance process*, were abstracted and described from the high-level application. All of the HDMUM components and their relationship were designed to build and realize the *dynamic maintenance process*, which is the core of whole model. The application examples showed that the HDMUM can support users to build different simulation cases flexibly and efficiently.

Keywords: virtual maintenance; dynamic maintenance process; HDMUM; XML script

引言

在海洋石油和天然气勘探开发过程中, 常常要面临水下生产设施发生故障和维修的问题, 而针对

水下维修作业人员进行训练, 存在训练成本高、培训效果差等问题。基于虚拟现实技术的水下维修仿真系统运行成本低廉, 能够有效的克服实际训练带来的问题, 为石油装备维修人员的训练提供一种新途径^[1-2]。

在传统虚拟仿真系统开发过程中, 除几何模型和物理仿真属性有相应的建模工具支持外, 作业流程和仿真案例大部分利用高级编程语言直接进行



收稿日期: 2016-05-30 修回日期: 2016-07-11;
基金项目: 国家自然科学基金(60873093); 国家科技重大专项(2011ZX05027-005);
作者简介: 纪连恩(1972-), 男, 山东高唐, 博士, 副教授, 研究方向为计算机仿真、图形学和人机交互技术。

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

• 2415 •

开发实现, 例如用 C、C++ 或 Java 等编程语言描述具体的仿真控制流程。仿真案例由复杂的高级程序语言进行编写的优点是通用性强, 几乎可以直接实现所有的虚拟作业流程和仿真案例, 但不足是抽象层次低, 建模难度大, 集成性低, 难以实现案例的快速开发和修改, 只能实现少量代码的重用。针对这些问题, 很多研究工作都致力于开发一套支持更高层次重用的仿真建模语言^[3]。文献[4]用规范语言 SDL(Specification and Description Language)实现仿真模型的完整描述; 美国 Boeing 公司提出了基于 XML 标准的仿真参考标记语言(Simulation Reference Makeup Language, SRML)规范, SRML 是一种可以灵活表示仿真模型, 加快仿真应用开发速度, 支持模型重用的描述语言^[5-6]。SRML 声明了一组数量较少但相对完备的 XML 元素和元素属性, 可以描述实体和实体间的关系事件, 概括了仿真模型的基本元素和行为框架, 可以面向不同领域对该语言进行扩展。文献[7]在 SRML 语言规范基础上进行了扩充, 定义了面向离散事件系统的仿真描述语言。SRML 描述语言对仿真元素和属性的定义也存在不足, 主要是需要结合仿真领域知识进行修改和完善。美国自 2005 年开始推出基于 XML 的军事仿真想定描述语言(Military Scenario Definition Language, MSDL)^[8], MSDL 可以有效地刻画军事仿真想定的具体内容和要素。在国内北京航空航天大学等建立了分布式虚拟环境基础信息平台 DVENET^[9], 针对虚拟环境的构造建立了描述模型。上述这些仿真模型描述语言主要是对静态仿真实体和作业场景的描述, 缺乏对动态作业流程的抽象和描述, 而作业流程是灵活构建水下虚拟维修案例的核心。

本文针对水下虚拟维修过程中维修资源繁多, 维修作业流程构成复杂等特点提出一种支持水下虚拟维修的高层仿真描述模型(HDMUM), 分别建立了仿真实体、作业场景和维修作业流程的仿真描述模型。通过设计水下虚拟维修作业领域通用的

XML Schema 描述结构, 映射生成用于描述虚拟维修作业流程的 XML 仿真脚本。脚本为维修作业流程提供了一个清晰的剧情和案例初始化描述, 通过仿真引擎对仿真脚本进行解析, 完成基于仿真描述模型驱动的水下虚拟维修流程。

1 水下虚拟维修作业分析

水下油气作业整体场景如图 1 所示, 通过对真实世界的水下维修作业过程进行分析, 将水下虚拟维修作业抽象为仿真实体、作业场景和维修作业流程, 把它们作为仿真模型描述的核心要素。仿真实体和作业场景是构成维修作业流程的基础, 仿真实体是整个维修流程的执行者和承担者, 作业场景为仿真实体提供了活动场所, 随着维修过程的进行, 作业环境也会发生变更。维修作业流程用于描述各维修阶段间的逻辑关系, 各阶段通过仿真实体和作业场景的状态和行为来刻画和触发, 对上述三要素的描述共同组成仿真描述模型, 用于灵活构建不同案例的维修作业流程。仿真模型实现框架结构如图 2 所示, 以下分别对组成 HDMUM 模型的三要素进行分析和设计。

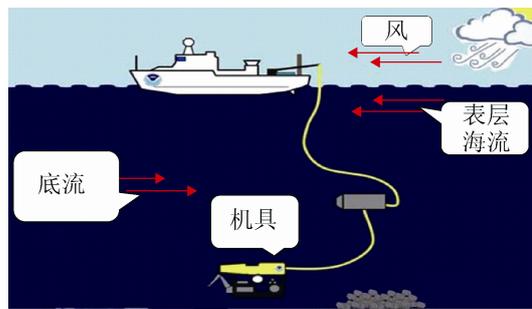


图 1 水下虚拟维修作业场景

2 HDMUM 模型详细设计

2.1 仿真实体描述

水下虚拟维修作业涉及大量的仿真实体, 主要包括维修工机具和生产设施两类。根据对仿真实体信息抽象的不同层次, 可以将仿真实体模型分为以下三个层次:

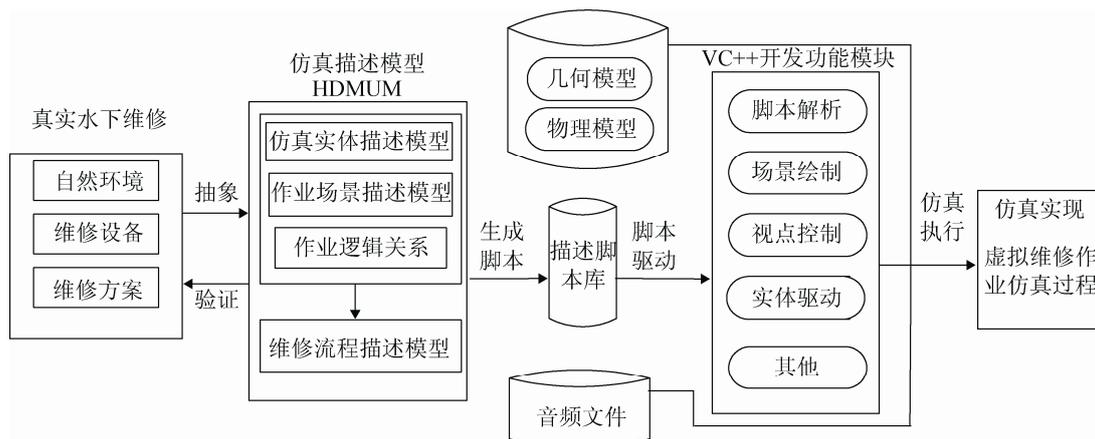


图 2 HDMUM 模型实现框架结构

- 应用语义层：面向水下虚拟维修应用语义的仿真实体描述；
- 逻辑控制层：基于高级语言实现的仿真实体属性和行为；
- 物理模型层：由三维建模工具构建的仿真实体模型。

在物理模型层，根据实际维修设备的物理结构和属性，利用建模工具建立仿真实体的物理表示模型；逻辑控制层以物理模型为基础，利用面向对象思想封装各仿真实体功能模块的数据类型和行为功能，以及模块间的逻辑关系；应用语义层则对仿真实体从高层应用的角度进行抽象和描述，表示该领域所有仿真实体的属性和行为等信息。

仿真实体的物理模型层通常由大量、复杂的零部件组成，图 3 为连接器安装工具的物理结构图。根据实际维修工具的组成结构，利用三维建模工具 Creator 和 Vortex Editor 建立仿真实体的几何模型和物理属性描述。根节点是完整独立的仿真实体 (Entity)；第二层节点代表装配体 (Assembly)，装配体由多个部件 (Part) 组成，部件 (Part) 是组成仿真实体的基本单元，图中的分枝代表各节点之间的从属关系。

在逻辑控制层，则根据仿真实体的物理结构将每个仿真实体封装成具有特定属性和行为的类和对象，然后通过高级语言和虚拟现实软件开发库实现对底层物理模型的逻辑控制。

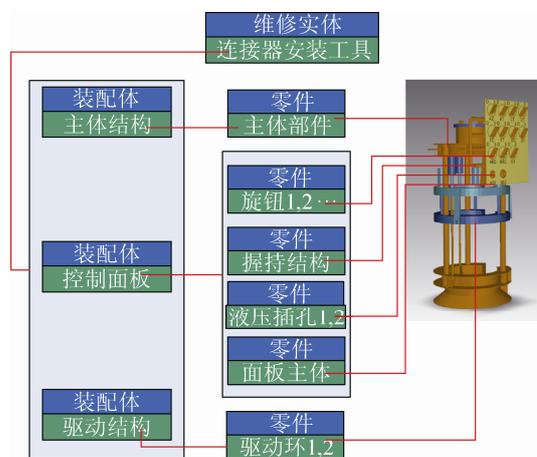


图 3 连接器安装工具的物理结构

而在仿真实体的应用语义层，则刻画其面向维修作业流程的用途和功能，主要包括实体的属性、组件、行为和状态特征，可用如下的四元组表示：

$$\text{Entity} = (\text{AttributeSet}, \text{Components}, \text{ActionSet}, \text{StateList});$$

其中 AttributeSet 为实体的属性集，该集合可表示为 $\text{AttributeSet} = \langle \text{Attr}_1, \text{Attr}_2, \dots, \text{Attr}_n \rangle$ ，这些属性包括仿真实体的标识编号、名称、位置和类型等属性；仿真实体类型可以分为收放工具、维修工具、运载工具和生产设施等。

Components 表示组成仿真实体的各个部件，可分为主动行为部件和被动行为部件。以图 3 中的维修工具为例，其中主体结构和控制面板中的旋钮和插孔为被动行为部件，驱动结构为主动行为部件。

ActionSet 表示实体的行为集合，它定义了水下维修作业过程中仿真实体的所有行为，分为主动行为和被动行为，每个行为与相应的部件相关联。

StateList 定义实体状态集由各部件的状态组成，这些静态实体的状态构成动态维修流程状态的一部分。除此之外用户也可以自定义仿真实体需要表达的其它信息。

仿真实体的模型描述结构如图 4 所示。描述模型定义了仿真脚本的框架结构，依据该结构生成连接器安装工具的仿真描述脚本。

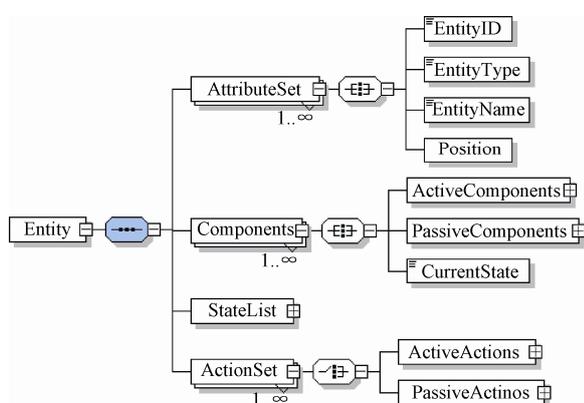


图 4 仿真实体的模型描述结构

2.2 虚拟作业场景描述

水下维修作业仿真场景是水下维修活动的场所，通过对真实水下维修作业环境进行分析，抽象出虚拟作业场景的框架结构，主要由观察视点、海上环境、海面环境、海底环境、场景声音和物理属性等几个部分组成。将上述的虚拟作业场景组成部分进行层次分解和表示，设计出适用于水下维修仿真作业领域的场景描述模型。可用如下六元组表示：

Scene=(Observer, Audio, Env, Ocean, Seabed, Phy_Attribute);

其中，Observer 为观察视点，可设置观察者的 Position、Orientation 及其绑定的 Channel，从而可从不同视点观察作业场景。Audio 为场景中的声音，可通过属性 Name 和 AudioPath 添加声音，如浪花声音、船只作业的噪声等。Env 表示虚拟作业

海上环境，包含时间、天气状况和光照等。例如可选择天气为 Default、Fog 等。Ocean 为海面环境，Seabed 则为海底环境，主要包含泥沙，地形，颗粒悬浮物，流体。工机具在海底作业时，对其影响最大的是流体。Phy_Attribute 为场景的物理属性，含有重力，拖曳力等。

另外，上述每个元素都具有子节点，用于详细描述每个元素的具体仿真信息。以海面环境为例，其又可以用六元组表示为：

Ocean=(Color, WaveDirection, Period, WaveHeight, WindSpeed, FlowSpeed);

其中，Color 表示海水颜色，WaveDirection 为波浪方向，Period 为波浪周期，WaveHeight 表示有义波高，WindSpeed 为海面风速，FlowSpeed 表示海水流速。通过这些元素可以全面的描述海面环境仿真信息，如表 1 所示为水下维修作业中不同的作业工况，利用上述的海面环境描述模型可以快速实现不同工况的仿真，仿真效果如图 5 所示。

表 1 水下维修作业工况

环境条件	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
主波方向/°	45	80	90	125
波浪周期/s	-	-	5.6	7.5
有义波高/m	0.06	0.08	0.18	0.27
风速/(m/s)	0.5	2.0	5.0	8.5
流速/(m/s)	0.1	0.5	0.8	1

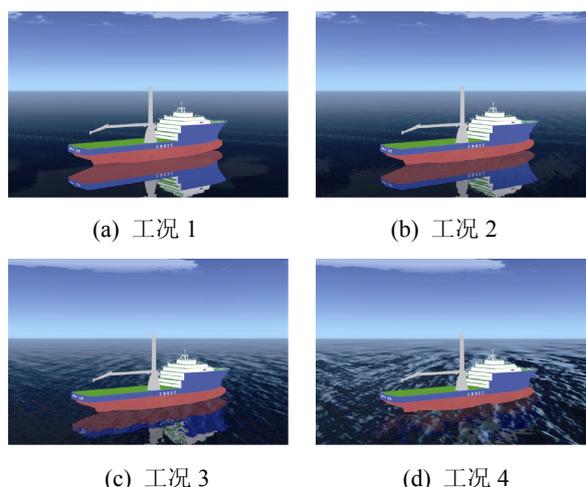


图 5 不同作业工况下的海面仿真环境

虚拟作业场景的描述结构模型如图 6 所示，通过场景描述模型可以快速、灵活的构建水下维修中

不同案例的作业场景, 除此之外, 作业场景也是维修作业流程描述的组成部分, 可以随着维修流程的推进变更作业场景。

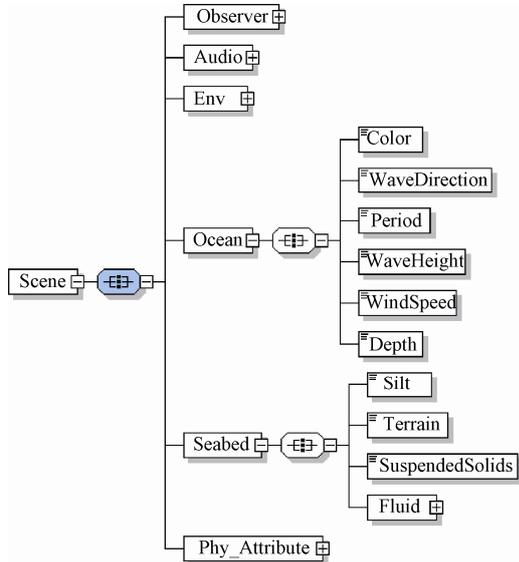


图 6 虚拟维修作业场景的模型描述结构

2.3 虚拟维修作业流程描述

水下油气生产设施的维修作业科目较多, 其机械维修流程环节复杂且操作步骤必须遵循特定的操作规则, 为了建立水下维修作业流程仿真模型, 通过对维修作业流程进行分析, 将维修作业流程分为不同的维修工序, 维修工序由多个仿真实体的一系列维修行为组成。每个维修工序又可拆分为不同的维修工步, 维修工步是由多个维修动作组成, 维修动作代表单个仿真实体的某个维修行为^[10]。

以采油树密封圈维修为例, 其维修流程可以分为 7 个维修工序, 分别为关闭采油树生产阀、下放连接器安装工具、打开连接器、更换密封圈、锁紧连接器、回收工具和恢复生产, 用 Petri 网表示维修流程如图 7 所示。其中, Pstart, Pi(i = 1...5)和 Pend 表示维修过程中各维修工序的状态, Ti(i = 0...6)表示各个维修工序。每个维修工序又可分为多个维修工步, 以下放连接器安装工具工序(T1)为例, 包括吊钩与连接器工具连接(T00)、起吊连接器(T11)、吊臂旋转至 45°(T22)、下放工具入水(T33)、下放工具到海底(T44)和安装工具到采油树固座(T55)6 个工步。

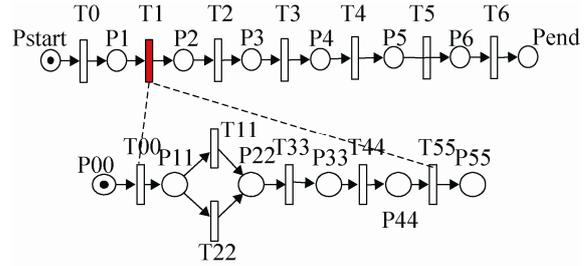


图 7 采油树密封圈维修流程 Petri 网

通过上述对实际维修流程的分析, 可以将维修作业流程的描述模型(Maintenance Process, MP)用五元组表示如下:

$$MP=(StatesList, Transition, Preconditions, WorkSeq, EventList);$$

维修流程模型描述结构如图 8 所示, 描述模型刻画了维修流程中的维修状态, 状态的变迁, 变迁发生的条件, 组成维修流程的各维修工序以及维修流程中的触发状态变迁的事件。

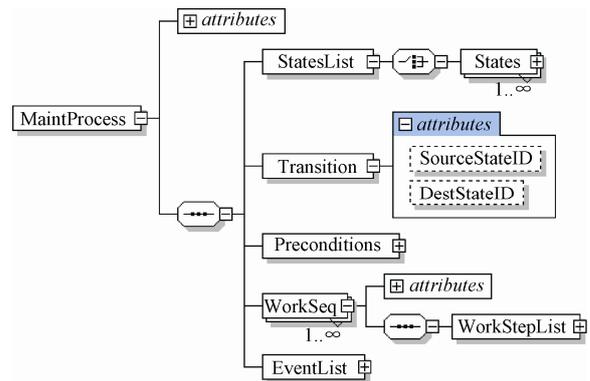


图 8 虚拟维修作业流程的模型描述结构

其中 StatesList 表示各个维修工序状态的集合, 如图 9 所示, 维修工序的状态具体由仿真实体描述模型(图 4)中的 StateList 和作业场景的状态构成。Transition 表示各状态之间的变迁; 变迁的初始状态和目的状态都通过 ID 来关联到仿真实体和场景的状态; WorkSeq 表示组成维修流程的维修工序, 如图 10 所示, 每个维修工序又可分为多个维修工步(WorkStep), 每个维修工步下的 Action 用仿真实体 Entity 中 ActionSet 的某个动作表示。EventList 是触发状态变迁的事件; 通过触发事件达到前提条件 Preconditions 使得相应状态发生变迁。

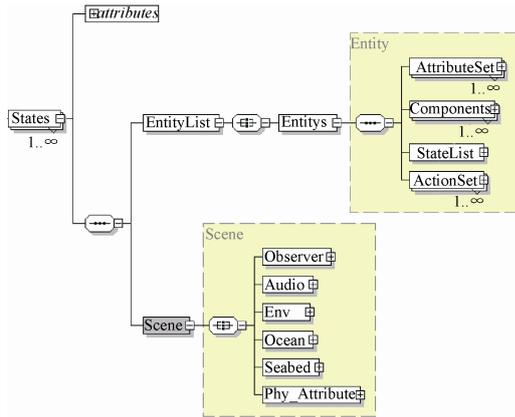


图 9 States 描述结构

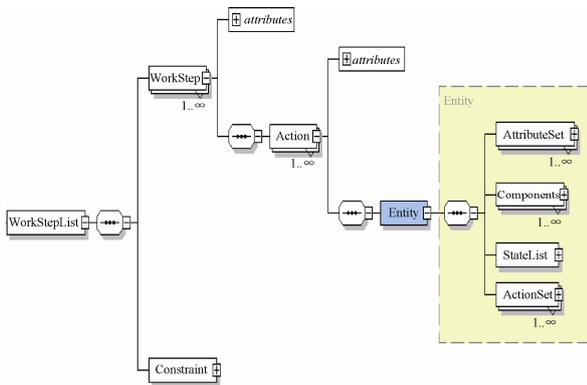


图 10 WorkStepList 描述结构

维修工序是维修案例在较大颗粒度层次上的分解，它们之间的约束关系均为顺序关系；维修工序是多个维修工步的集合，表示为 $WorkSeq=(WorkStep1, \dots, WorkStepi, \text{且 } i \geq 2)$ 。维修工步是维修案例中相对维修工序来说，较小颗粒度的分解，它们之间的关系可以分为顺序、同步和互斥三种。可以表示为 $Constraint=(Sequence, Synchronization, Mutex)$ 。

上述顺序关系 $Sequence(WorkStep1, WorkStep2)$ 表示只有当维修工步 $WorkStep1$ 结束后，维修工步 $WorkStep2$ 才能开始执行。同步关系 $Synchronization(WorkStep1, WorkStep2)$ 表示维修工步 $WorkStep1$ 和 $WorkStep2$ 可以同时开始执行。互斥关系 $Mutex(WorkStep1, WorkStep2)$ 则表示两个维修工步的执行效果相互冲突，只能选择其中一个执行。单个维修工步是由某个仿真实体的一系列维修动作和场景变化组成，这些维修动作之间也存在着相互约束的关系，用元素 $ConsAction$ 来表示。

用户通过流程描述模型可迅速将不同的维修方案配置成仿真系统可以解析的脚本，而不需要过多考虑底层仿真功能的实现。

3 系统实现与应用案例

基于上述 HDMUM 模型，设计开发了面向深水水下应急维修作业仿真应用的虚拟现实引擎，系统的总体架构如图 11 所示。

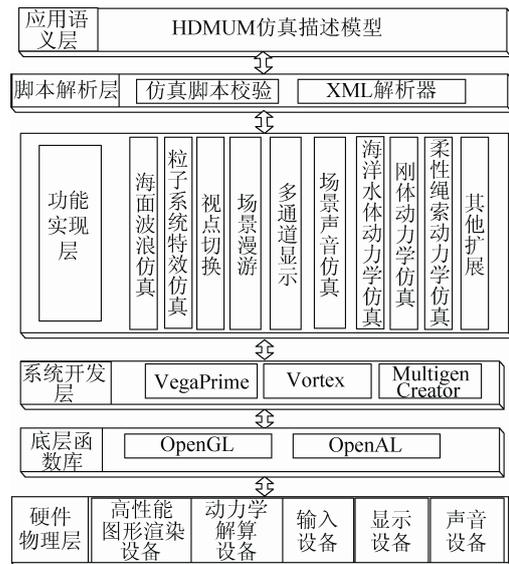


图 11 虚拟仿真系统总体框架

首先应用语义层实现对作业流程和仿真案例的脚本描述，接下来对脚本进行解析。XML 脚本是基于树形结构和层次化的语言，在用 C++ 开发的水下维修仿真系统中可以方便的通过 XML 解析器 (TinyXML) 完成脚本的解析。通过基于 DOM 的解析方式，将脚本以节点树的形式读入内存，底层的仿真程序通过访问节点树来获取脚本内容，然后利用脚本信息来驱动仿真系统中各功能模块，各仿真功能模块基于 Vega Prime 和 Vortex 仿真平台上进行二次开发^[11-12]。通过该系统可以快速实现多个维修案例的仿真。

根据图 8 的流程仿真描述模型生成的水下采油树密封圈更换案例中部分维修工序的脚本片断如下所示，包括关闭生产设施和下放连接器安装工具两个工序。这两个维修工序的初始状态可通过 StatesList 设置。

```

<MaintProcess>
  <StatesList>
    ...<State ID=004>
      ...<Entity Name =“Christmastree”>
        <StateList>
          <State CompName =“ButtonMV4”>0°
          </State> //初始旋钮 MV4 在‘S’态
        ...</StateList></Entity>
        <Scene>...</Scene><State ID=005>...
      </StatesList>...
    <WorkSeq ID=01> //关闭生产设施工序
      <WorkStepList>
        <WorkStep ID=001> //关闭生产阀
          ...<Entity Name =“Christmastree”>
            <ActionSet>
              <PaAction CompName=“ButtonMV4”
                Angle=90°>
                CloseMV4</PaAction> //操作完成后 MV4 旋转到‘O’状态
              <PaAction CompName=“ButtonMV5”
                Angle=90°>
                CloseMV5</PaAction>
            ...</ActionSet></Entity>
          ...</WorkStep>
        </WorkStepList>
      </WorkSeq>
    <WorkSeq ID=02> //下放连接器安装工具工序
      <WorkStepList>
        <WorkStep ID=001> //连接下放工具
          ...<Entity Name =“Crane”><ActionSet>
            <AcAction CompName =“Hook”>ConnectAction
            </AcAction>
          ...</ActionSet></Entity>
          ...</WorkStep>
        <WorkStep ID=002> //起吊工具
          ...<Entity Name =“Crane”><ActionSet>
            <AcAction CompName =“Arm”
              Angle=60°>LiftArm
            </AcAction>
          ...</ActionSet></Entity>
          ...</WorkStep>
        <WorkStep ID=003> //旋转吊臂
          ...<Entity Name =“Crane”><ActionSet>
            <AcAction CompName =“Arm”
              Angle=45°>Rotate
            </AcAction>
          ...</ActionSet></Entity>
          ...</WorkStep>
        ...</WorkStepList>
      </WorkSeq>
    ...</MaintProcess>
  
```

由该脚本生成的虚拟维修作业仿真过程如图 12 所示, 关闭生产设施工序对应脚本中 WorkSeq_01, 包括两个维修工步: ROV(水下机器人)关闭生产阀(WorkStep_001)和 ROV 远离采油树。关闭生产阀的工步又由一系列动作构成, 如仿真脚本中描述的 PaAction, 关闭生产设施工序的仿真结果分别对应图 12(a)和图 12(b); 当关闭生产设施工序完成后, 仿真状态变迁到下放连接器安装工具工序(WorkSeq_02)的开始状态, 下放工序实现图 7 中的六个维修工步, 分别对应图 12(c)到 12(h)。维修工步的动作利用脚本中的 AcAction 来表示, 如旋转吊臂工步(WorkStep_003)中 Rotate 表示该维修工步中吊臂的旋转, Angle 表示吊臂旋转的角度。这样通过配置描述高层应用语义的脚本, 可以更灵活地实现对虚拟仿真中作业流程的控制和修改。

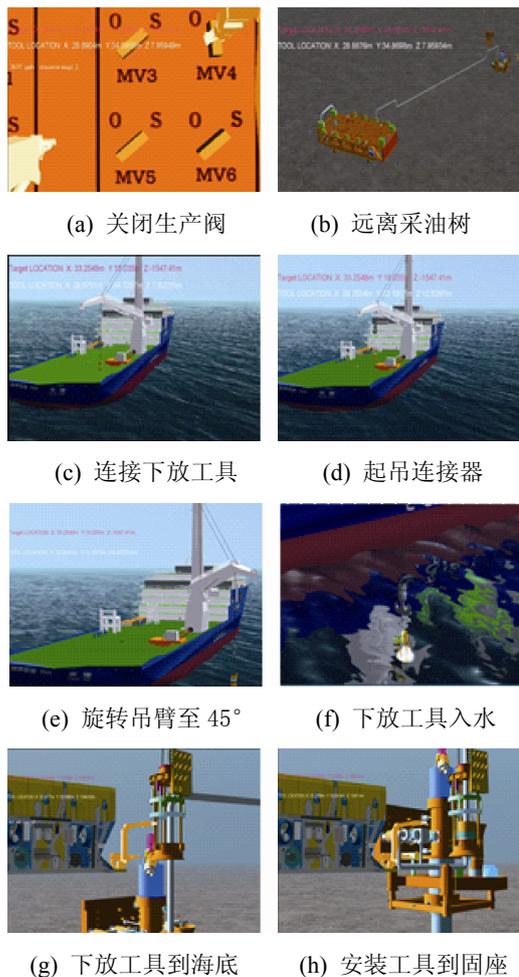


图 12 采油树维修作业过程虚拟仿真

4 结论

针对作业流程和仿真案例构建和修改困难的问题, 本文提出并建立了一种支持水下虚拟维修作业的高层仿真描述模型(HDMUM), 它可以有效描述水下虚拟维修作业流程, 让仿真开发人员专注于水下维修方案的制定, 而不需要关心如何用高级编程语言去实现底层的仿真功能和模型控制; HDMUM 模型采用多层抽象和模块化的描述方法, 分别对仿真实体、作业场景和维修作业流程进行描述, 方便实现描述模型的重用和扩展; 最后由于这种描述模型采用 XML 脚本表示, 很容易移植到其他仿真系统中。

进一步的工作包括开发可视化的高层模型描述工具, 面向大规模分布式仿真对 HDMUM 模型进行扩展, 增强其描述能力, 同时优化模型描述信息, 减少描述模型中的冗余信息, 提高脚本文件的解析效率。

参考文献:

- [1] 赵沁平. 虚拟现实综述 [J]. 中国科学, 2009, 39(1): 2-46.
- [2] 纪连恩, 孙晓宇, 郭文生. 基于 Vortex 的水下实时动力学虚拟仿真环境研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(9): 2020-2026. (Ji Lianen, Sun Xiaoyu, Guo Wensheng. Research on Real-time Virtual Simulation of Underwater Dynamics Environment Based on Vortex [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2013, 25(9): 2020-2026).
- [3] Blunk A, Fischer J. Efficient Development of Domain-Specific Simulation Modelling Languages and Tools [C]// SDL 2013: Model-Driven Dependability Engineering. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 163-181.
- [4] Casas P F I, Pi X, Casanovas J, et al. Definition of Virtual Reality Simulation Models Using Specification and Description Language Diagrams [C]// SDL 2013: Model-Driven Dependability Engineering. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 258-274.
- [5] Reichenthal S W. The Simulation Reference Markup Language (SRML): a Foundation for Representing BOMs and Supporting Reuse [C]// Proceedings of Fall 2002 Simulation Interoperability Workshop. USA: The Simulation Interoperability Standards Organization, 2002: 285-290.
- [6] Reichenthal S W. SRML Case Study: Simple Self-Describing Process Modeling and Simulation [C]// IEEE Proceedings of the 2004 Winter, USA: IEEE, 2004 (2): 1461-1466.
- [7] Liu C, Li Q, Wang W P, et al. Extend SRML Schema Based on DEVS: an Executable DEVS Language [C]// Proceedings of the 37th Conference on Winter Simulation. USA: Winter Simulation Conference, 2005: 2693-2699.
- [8] Franceschini D, Franceschini R, Burch R, et al. Specifying Scenarios Using the Military Scenario Definition Language [C]// Proceedings of the 2004 Simulation Interoperability Workshop. USA: The Simulation Interoperability Standards Organization, 2004: 46-58.
- [9] 赵沁平, 何红梅. DVENET 分布式虚拟环境 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [10] He Jianbin, Sun Qunxing, Liu Pengyuan. Modeling and Analysis of Equipment Virtual Maintenance Process Based on Extended Petri Net [C]// IEEE International Forum on Information Technology and Applications, USA: IEEE, 2009(3): 181-184.
- [11] Presagis. Vega Prime Options Guide [Z]. USA: Presagis Inc, 2011.
- [12] CMLabs. Vortex 5.1.0 Vx Developer Guide [Z]. Canada: CMLabs Simulations Inc, 2012.