

1-8-2019

## Design and Realization of Behavior Tree in Weapon Equipment Virtual Maintenance Training System

Wensheng Xu

*Shanghai Precision Metrology & Test Research Institute, Shanghai 201109, China;*

Wu Bo

*Shanghai Precision Metrology & Test Research Institute, Shanghai 201109, China;*

Jianhong Jiang

*Shanghai Precision Metrology & Test Research Institute, Shanghai 201109, 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.

---

## Design and Realization of Behavior Tree in Weapon Equipment Virtual Maintenance Training System

### Abstract

**Abstract:** To solve the problem of long development period of virtual maintenance training system for complicated weapon equipment, the 3D modeling, the behavior modeling and the decision modeling of virtual maintenance were studied. *The behavior trees design model was applied to analyze, design and develop the system* which was tested in the maintenance case of marching tensioning device of a certain weapon equipment. The scripting unit and the running efficiency of the behavior trees model in the case were tested. The test results showed that this design method with behavior tree model has better scalability and model description clarity, and can be used for the development of all kinds of equipment virtual maintenance training systems.

### Keywords

weapon equipment, virtual maintenance, virtual reality technology, behavior tree, FSM

### Recommended Citation

Xu Wensheng, Wu Bo, Jiang Jianhong. Design and Realization of Behavior Tree in Weapon Equipment Virtual Maintenance Training System[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(7): 2722-2728.

# 武器装备虚拟维修训练系统行为树设计与实现

徐文胜, 武博, 蒋坚鸿

(上海精密计量测试研究所, 上海 201109)

**摘要:** 针对复杂武器装备部件繁多、维修过程复杂导致虚拟维修系统开发周期长的问题, 研究了虚拟维修相关的三维建模、行为建模、决策建模, 运用行为树设计模式进行了系统分析、设计和开发, 并通过某武器装备行军拉紧器的虚拟维修案例进行了应用验证, 最后对开发案例中行为树模型的脚本单元和运行效率进行了测试, 测试结果表明基于行为树模型的设计方法具有良好的扩展性和模型描述清晰度, 为各种装备虚拟维修训练系统的开发提供了参考和借鉴。

**关键词:** 武器装备; 虚拟维修; 虚拟现实技术; 行为树; 状态机

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 07-2722-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807036

## Design and Realization of Behavior Tree in Weapon Equipment Virtual Maintenance Training System

Xu Wensheng, Wu Bo, Jiang Jianhong

(Shanghai Precision Metrology & Test Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** To solve the problem of long development period of virtual maintenance training system for complicated weapon equipment, the 3D modeling, the behavior modeling and the decision modeling of virtual maintenance were studied. *The behavior trees design model was applied to analyze, design and develop the system* which was tested in the maintenance case of marching tensioning device of a certain weapon equipment. The scripting unit and the running efficiency of the behavior trees model in the case were tested. The test results showed that this design method with behavior tree model has better scalability and model description clarity, and can be used for the development of all kinds of equipment virtual maintenance training systems.

**Keywords:** weapon equipment; virtual maintenance; virtual reality technology; behavior tree; FSM

## 引言

随着计算机软、硬件技术的迅速发展, 基于虚拟现实技术的虚拟维修训练为基层部队提供了一种费效比很高的武器装备维修训练手段, 通过构建适人化的虚拟训练环境, 代替实战装备进行训练,

有效克服实装训练带来的受时间和场地限制、训练成本高、易损坏装备等弊端, 提高了基层部队对武器装备的自主维修能力, 促进了基层部队维修保障能力的快速形成<sup>[1-4]</sup>。武器装备虚拟维修操作多为虚拟环境中机械类设备待修零部件的拆装和更换模拟, 涉及到一系列拆装操作组成和零部件间约束关系下的操作序列, 因此需要建立合理的过程模型对虚拟维修过程进行描述。采用有限状态机进行过程建模, 可将操作过程的状态分割为多个状态, 每个状态又进一步分割<sup>[5]</sup>, 该方法更依赖于被预编程



收稿日期: 2017-07-29 修回日期: 2017-12-06;  
作者简介: 徐文胜(1970-), 男, 江西, 硕士生, 高工, 研究方向为软件架构、虚拟现实开发与应用; 武博(1981-), 男, 山西, 博士生, 工程师, 研究方向为硬件开发、虚拟现实开发与应用; 蒋坚鸿(1987-), 男, 浙江, 硕士生, 工程师, 研究方向为软件开发、虚拟现实开发与应用。

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

• 2722 •

序的基于规则的场景,其主要问题在于有限的可扩展性,很难合理描述包含大量装备模型、过程模型和行为模型且状态转换复杂的武器装备维修训练过程。基于图论的方法进行维修过程建模,能清楚描述每个维修状态间的数据关系,可以表达具有复杂结构关系的维修过程,主要包括连接图模型、ANO/OR 图模型、有向图模型、Petri 网模型等<sup>[6-8]</sup>,但使用该方法进行过程建模存在节点过多、建模方法复杂、不利于对模型的理解等问题。使用行为树建立维修过程模型,不需进行繁琐的状态设计,而是组合成容易理解的逻辑模块并将这些逻辑模块进行合理的设计和排列,通过模块化的方式描述有限任务间的切换,可以使用分层结构的任务方式描述复杂的维修训练过程。

本文对武器装备虚拟维修行为、过程进行分析,根据教、学员在虚拟维修环境中的行为处理复杂维修流程,构建由根节点展开分支、子节点无限制扩展的行为树模型,并根据不同阶段的维修行为对行为树依条件自上而下进行遍历,找到唯一的叶节点(行为节点),并执行该叶节点的维修动作,通过不同行为节点描述维修过程内部的行为逻辑,使得每个独立状态可逻辑重用,实现维修状态模块化、规模化,提高武器装备的虚拟维修训练系统的开发效率。

## 1 武器装备虚拟维修过程需求分析

武器装备虚拟维修是实际维修过程在计算机上的仿真过程<sup>[5]</sup>,须形象、直观地演示武器装备结构、原理、拆装分解过程及各种典型故障的维修过程,同时能够指导维修人员进行维修训练,包括准备、故障检测、拆卸、换件或修复原件、安装、调试及检验等几乎全部的实际装备维修活动。在保证战备完好性的基础上,让部队用户熟悉武器装备的结构、维修训练科目。本文对某武器装备行军拉紧器的维修业务进行分析,其维修行为过程如图 1 所示。

图 1 中,训练科目要素主要包括:界面 UI、

场景、维修对象模型、动作、动画、事件、解说词等。界面 UI 是整个系统的交互控制;场景是维修行为具体发展过程中阶段性的横向展示,如维修车间、维修台、火力发射车等;维修对象模型是维修行为过程中涉及到的各个模型,如行军拉紧器、拉索、涡轮轴、工具等;动作是维修行为基础构成,如拾取零件、放置零件等;动画是维修行为中触发执行的表现,如螺钉的拧松、工具的旋转等;事件是可以被系统识别的操作,如刷新、行为树控制、碰撞检测等;解说词是维修行为的语音操作提示。

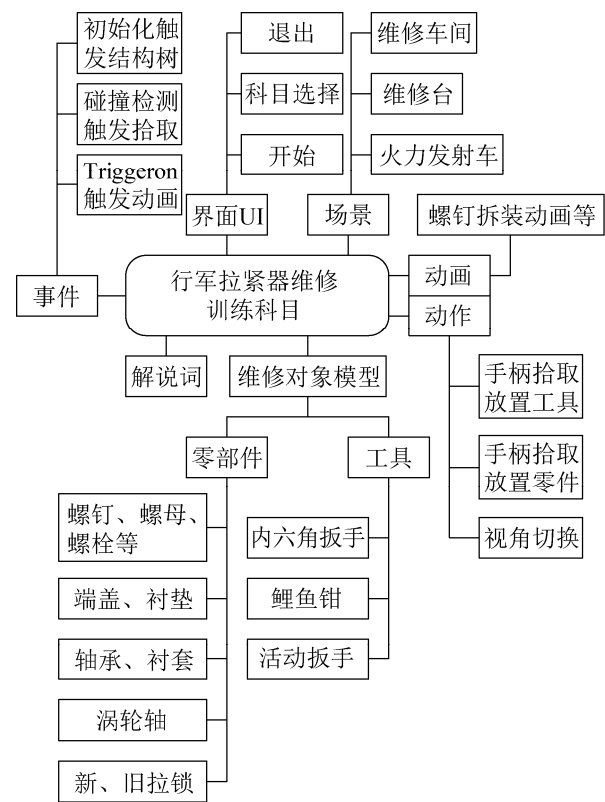


图 1 某武器装备行军拉紧器维修行为结构图  
Fig. 1 Maintenance behavior structure diagram of marching tensioning device

## 2 武器装备虚拟维修训练系统行为树设计

### 2.1 虚拟维修行为树任务设计

行为树的基本元素是任务(Node)。在虚拟维修系统中,一般有拆卸、装配复合任务,每一类任务又包含训练开始、语音提示、工具选择、抓取工具、

动画播放、维修动作开始、放下工具、抓取零件、零件放置、维修动作结束、训练结束等动作任务。这些任务有顺序节点、选择节点、并行节点、装饰节点、条件节点和动作节点等, 各类任务定义如下:

(1) 顺序节点(Sequence Node)

当前任务完成后将顺序执行下一任务, 如抓取零件后, 将会顺序执行零件放置到指定的零件盒中。

(2) 选择节点(Selector Node)

当前任务完成后, 需要根据执行的结果来决定下一个任务。如抓取工具任务完成后, 需对当前操作对象(零件)进行判断, 如该零件有相应动画提示, 则在碰撞检测成功后, 进入动画演示任务, 否则下一个任务将是维修动作开始。

(3) 并行节点(Parallel Node)

当前任务完成后, 下一步可以同时执行的子任务。如在抓取工具后, 将要执行的下一步可操作对象(零件组)没有优先顺序关系时, 可以根据用户的随机行为对其选取的任一并行节点执行相应任务。

(4) 装饰节点(Decorator Node)

只有一个子任务, 该节点可以改变其子任务的行为。如在播放动画时, 可以根据需要设定动画的播放时间、播放次数。

(5) 条件节点(Conditional Node)

仅当满足自定义的条件时返回 true。如一组螺母全部拆卸完毕, 返回 true。

(6) 动作节点(Action Node)

完成具体的一次行为, 按照完成情况返回结果, 不含子节点。如执行动画、拿起工具等。

2.2 虚拟维修行为树控制设计

在虚拟维修训练系统的行为树中, 需要以武器装备的维修流程为对象, 进行各类碰撞检测、节点选择、动作执行、动画播放、层次关系确定、边界条件检查等工作<sup>[9-13]</sup>。行为树的每个节点都可能存在多个判断条件, 因此需要构建一个专门的控制类, 根据当前操作的节点, 运用递归算法, 完成整个操作过程。

行为树控制类(CtrlClass)包含成员变量 Tree, Tree 是若干任务节点(Task)组成的一个树型数据结构, 其类图如图 2 所示。CtrlClass 通过 Tree 对各个任务节点进行控制。Task 分为复合节点(Composite)和叶子节点(Leaf)两种, 包含父节点、兄弟节点、子节点、子节点数、是否有序、待拆卸零部件对象、工具、零件盒位置、操作语音提示、是否有动画等基本信息。Composite 用于虚拟维修过程的逻辑控制; Leaf 对应一个零部件的具体操作任务。每个 Task 都有一个完成标志, 当所有子任务都已完成时该标志置位。Task 内部定义了一个类(Disassembly), 用于实现对单个零部件的拆装控制。



图 2 虚拟维修行为树 UML 图  
Fig. 2 UML diagram of virtual maintenance behavior

CtrlClass 通过 Tree 实现任务节点的时序控制, 其行为树结构见图 3, 整个结构树由根节点、顺序节点、并行节点、执行节点和装饰节点组成。其中执行节点为独立的行为节点, 这些行为节点可按照串行、并行、选择等逻辑关系进行添加和删减, 从而对行为树模型节点进行扩展, 可以看出行为树模型能够清晰的描述各个行为节点之间的逻辑关系。

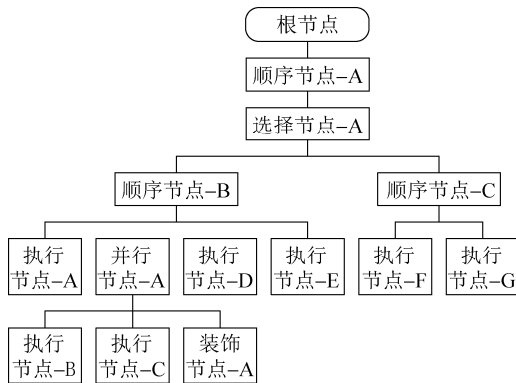


图 3 行为树结构图

Fig. 3 Structure diagram of behavior tree

### 2.3 虚拟维修训练单个零部件操作行为树设计

单个零部件的操作流程见下图 4, 其所有可能操作动作节点表示, 如操作开始、拿起工具、播放语音提示、放置零部件等。

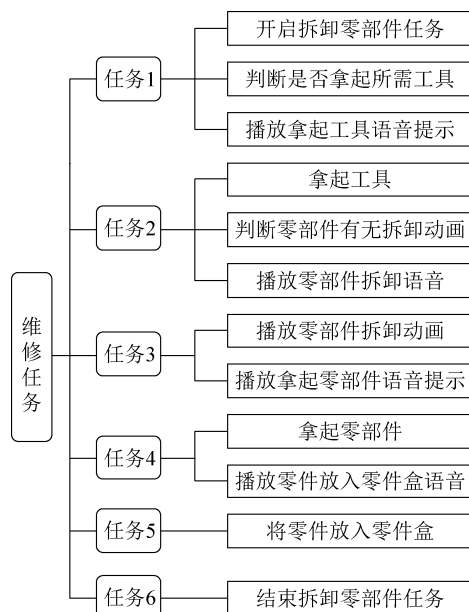


图 4 零部件操作流程图

Fig. 4 Flow diagram of parts operation

每个零部件的操作树都包含 6 个任务节点, 每执行完一个任务节点, 操作流程停止, 并等待用户的操作事件以驱动操作流程的继续执行。6 个任务节点的具体内容如下:

- (1) 开启拆卸零部件任务。判断用户是否拿着所需工具, 如果没有, 播放拿起工具提示语音, 否则不播放;
- (2) 如果当前任务中用户没有拿着所需工具, 则拿起工具。判断是否有操作动画, 如果有, 则播放操作语音, 如果没有, 跳过继续;
- (3) 如果第二步有操作动画, 则播放操作动画, 否则不播放。播放拿起该零部件语音提示;
- (4) 拿起零部件, 播放将拾起的零部件放入零件盒语音提示;
- (5) 将零部件放入零件盒;
- (6) 结束零部件操作任务。

### 3 武器装备虚拟维修训练系统行为树应用实例

本文将行为树模型应用于某防空反导武器系统火力发射车行军拉紧器虚拟维修案例。开发的虚拟维修训练系统在设计节点时设定了一些通用的动作节点, 复合节点只做条件判定, 用于总体逻辑控制, 确保虚拟维修过程与实际的维修过程一致, 并保证在维修过程中工具与零件、零件与零件放置盒、拆装顺序的匹配准确性。

行为树处理引擎用于复合节点(包括选择节点、顺序节点)、装饰节点、条件节点和动作节点等 4 大类型节点的基础逻辑处理以及业务节点的逻辑处理。只有条件节点和动作节点可作为叶子节点, 具体的小粒度逻辑由叶子节点去实现(和状态机中的单个状态一样), 动作节点基本上都返回 true, 表示该动作完成。具体实现如下:

- (1) 构建维修装备部件的整体树结构

伪代码:

```
private StepNodebuild_tree();
```

```
StepNode root = new StepNode();
```

```

root.virtualNodeInit("root", null, true);
root.addChildren(children);
return root

```

### (2) 选择节点

选择节点是“或”的关系，当执行选择节点时，它将从自己的第一个儿子节点递归执行到最后一个，如遇到一个儿子节点执行后返回 True，将停止递归，后续的节点不会被执行，本节点向自己的父节点也返回 True；否则所有儿子节点都返回 False，本节点也向自己的父节点返回 False。

伪代码：

```

bool Do Action():
foreach (child in children):
    if child.Do Action():
        return true
    return false

```

### (3) 顺序节点

顺序节点是“与”的关系，当执行选择节点时，它将从自己的第一个儿子节点递归执行到最后一个，如遇到一个儿子节点执行后返回 False，将停止递归，后续的节点不会被执行，本节点向自己的父节点也返回 False；否则所有儿子节点都返回 True，本节点也向自己的父节点返回 True。

伪代码：

```

bool Do Action():
foreach(child in children):
    if not child.Do Action():
        return false
    return true

```

### (4) 装饰节点

装饰节点主要用于控制动画动作节点的播放时间控制和跳过执行本节点操作，直接返回 True。

伪代码：

```

bool Do Action():
    return true

```

条件节点

检查本节点状态、子节点完成情况。

伪代码：

```

bool Do Action():
return checkResult:

```

### (5) 动作节点

训练开始、语音提示、工具选择、抓取工具、动画播放、维修动作开始、放下工具、抓取零件、零件放置、维修动作结束、训练结束、条件判断等各种原子行为。

伪代码：

```

bool Do Action():
dosomething:
return true

```

本文基于 Unity 3D 平台，使用 Behavior Designer 插件用于维修行为树的任务编辑，行为树解析引擎用 C#实现，最后在 PC 机上发布，系统运行效果如图 5 所示。

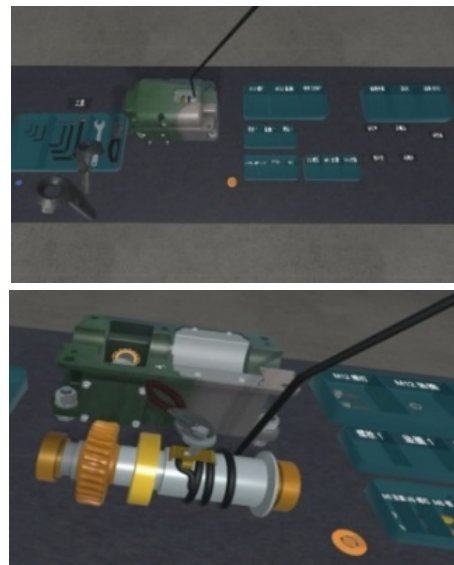


图5 虚拟维修样机

Fig. 5 Virtual maintenance prototype

## 4 武器装备虚拟维修训练系统行为树验证分析

本文对行为树脚本单元测试验证，由于本系统的行为树模块包括的组建较多，其中关键的内容为数据结构、刷新机制和事件响应等，测试用例列表如表 1 所示。

表 1 行为树模块测试用例表  
Tab. 1 Test case of behavior tree module

用例编号	输入	预期结果	结论
1	通过继承父节点扩充 1 个动作子节点, 并将该子节点放入行为树中	扩充的行为树节点的 Action() 方法被调用	符合预期
2	创建一个带有 4 个子节点的选择节点, 其中只有第 2 个子节点返回 true	第 2 个子节点的 Action() 方法被执行	符合预期
3	创建一个带有 4 个子节点的顺序节点, 其中只有第 3 个子节点返回 false	第 3 个子节点的 Action() 方法被执行	符合预期
4	创建一个带有 3 个子节点的并行节点, 任意子节点均可返回 true	随机子节点的 Action() 方法被执行	符合预期
5	创建一个带有 2 个子节点的条件节点, 其中只有 1 个子节点返回 true	第 1 个子节点的 Action() 方法被执行	符合预期
6	创建一个带有 1 个子节点的装饰节点, 执行时间设置为 2 秒	子节点 Action() 方法执行时间为 2 秒	符合预期
7	在行为树运行环境中加入各种参数, 添加一个 trigger 事件, 并在系统每帧刷新事件中触发该事件	执行的 Action() 方法能够获取运行环境中的参数, 执行节点每帧都会被调用	符合预期

测试结果表明, 行为树能正确支持行为节点代码扩充, 且可以正确控制节点的逻辑关系, 运行时能将系统的实时参数传入行为节点中, 事件系统、刷新机制也能有效对行为树进行驱动。本文对行为树的运行效率进行测试, 测试软硬件环境见表 2。

表 2 测试环境列表  
Tab. 2 Test environment list

名称	参数
处理器	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2667 v3 @3.20GHz
内存	128GB
显卡	NVIDIA Quadro M6000
操作系统	Microsoft Windows 7 旗舰版 64 位
开发平台	Unity 3D

程序运行时的性能参数如图 6 所示, 其中帧率

FPS 为 122.2, 当前占用 CPU 进行计算的时间为 8.2ms, GPU 渲染线程处理图像所花费的时间为 1.4ms, 达到了高效率的实时运行。



图 6 系统运行状态参数

Fig. 6 Status parameters of system operation

行为树结构虚拟系统通过结构的层级递进, 可以将系统中的行为以父子节点的关系进行表示, 而每一层的行为仅影响下一层行为。在行为树结构中, 每一段父子节点均可形成单独的一段流程, 使得在整个整棵树中, 可以独立存在多种不同的行为模式。图 7 所示为行为树节点扩展界面。

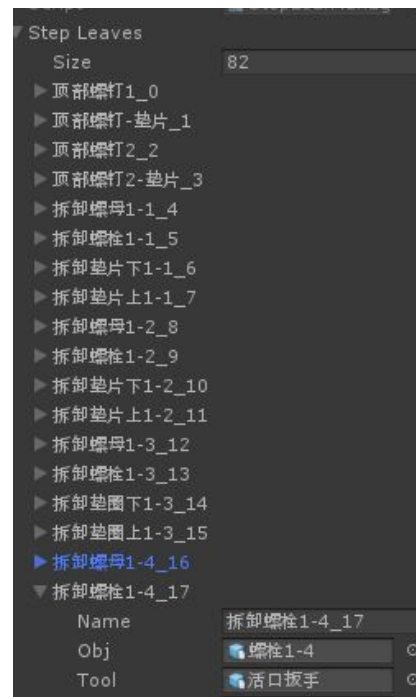


图 7 行为树节点扩展界面

Fig. 7 Extension interface of behavior tree nodes



在该界面上可以添加拆卸螺钉、螺母等行为节点同时保持不同节点间的逻辑关系,反之则删除节点。当使用状态机来实现这些操作,其不同状态间的转移耦合度高,需要建立很复杂的跳转条件来解决并行、串行、选择等逻辑关系,代码上实现上就会显得比较吃力,要维护的状态量也会成倍增加。因此,相较于状态机的表示方式,行为树只需按规范去写节点,然后把节点连接为行为树,具有更好的可扩展性。

## 5 结论

本文主要研究了行为树在基于虚拟现实技术的武器装备虚拟维修训练系统中的设计与实现。根据装备维修训练的具体特点,通过对行为树编辑器插件的扩展使用及行为树处理引擎的设计实现,完成了行军拉紧器虚拟维修训练案例。面向结构复杂的武器装备,行为树的使用极大地提高了虚拟维修系统的开发效率,增加了系统构建的便捷性,进而提高了系统模块的复用度,对于规范各种武器装备虚拟维修训练的开发,提高部队装备保障能力具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学(F辑: 信息科学), 2009, 26(5): 2-46.  
Zhao Q P. Review of Virtual Reality[J]. Science in China (F: Information Science), 2009, 26(5): 2-46.
- [2] 谭继帅, 郝建平, 王松山. 装备虚拟维修训练研究与发展综述[J]. 兵工自动化, 2007, 26(5): 105-109.  
Tan J S, Hao J P, Wang S S. Review of the Research and Development of Equipment Virtual Maintenance Training [J]. Ordnance Industry Automation, 2007, 26(5): 105-109.
- [3] 刘玉海, 俞康伦, 张锡恩. 基于虚拟现实的装备维修仿真训练系统研究[J]. 计算机仿真, 2002, 19(2): 49-51.  
Liu Y H, Yu K L, Zhang X E. Research on Function Modeling in Virtual Equipment [J]. Computer Simulation, 2002, 19(2): 49-51.
- [4] 刘玉海, 张锡恩. 某大型导弹武器系统虚拟维修系统[J]. 兵工学报, 2004, 25(5): 562-566.  
Liu Y H, Zhang X E. A Virtual Environment Missile Equipment Maintenance Services System[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(5): 562-566.
- [5] 冯凌云. 基于状态机 AI 技术的网络游戏[D]. 上海: 复旦大学, 2011: 12-66.  
Feng L Y. The Network Game Based on State Machine AI Technology [D]. Shanghai: Fudan University, 2011: 12-66.
- [6] R Bastide, P Palanque. A Petri Net Based Environment for the Design of Event-Driven Interfaces [C]//16th International Conference on Application and theory of Petri Nets, Torino, Italy, Italy: ATPN, 1995: 66-83.
- [7] Jensen K Coloured. Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods, and Practical Use (Volume 2). [M]. 2nd Edition. New York, USA: Springer, 1996.
- [8] Zhou Y, Murata T, Defanti T. Modeling and Performance Analysis Using Extended Fuzzy-timing Petri Nets for Networked Virtual Environments [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics (S1094-6977), 2000, 30(5): 737-756.
- [9] 卢晓军. 维修仿真中虚拟人动作建模与行为控制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.  
Lu X J. Research on Virtual Human Action Modeling and Behavior Control in Maintenance Simulation [D]. Changsha: NUDT, 2006.
- [10] 王振宇. 计算机游戏中智能角色行为的研究与实现[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2010: 1-70.  
Wang Z Y. Research and Implementation of Intelligent Role Behavior in Computer Games [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2010: 1-70.
- [11] 解璞, 苏群星, 谷宏强. 装备虚拟维修训练系统设计方法研究[J]. 系统仿真学, 2006, 18(8): 2195-2198.  
Xie P, Su Q X, Gu H Q. Research on development and Design Method of Virtual Maintenance Training System of Equipment[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(8): 2195-2198.
- [12] 邓永健. 手机网络游戏 AI 行为树的设计与实现[D]. 广州: 中山大学, 2014: 1-60.  
Deng Y J. The Design and Realization of Networked Mobile Game AI Behavior Tree [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2014: 1-60.
- [13] 黄淘, 张豫南, 李瀚飞, 等. 基于 Project 的虚拟维修拆装过程建模[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(1): 192-196.  
Huang T, Zhang Y N, Li H F, et al. Disassembly and Assembly Process Modeling for Virtual Maintenance Based on Project[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(1): 192-196.
- [14] 郑林, 李健, 刘祥凯, 等. 一个视景仿真平台的设计与开发[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(5): 1182-1188.  
Zheng L, Li J, Liu X K, et al. Design and Development of Scene Simulation Platform[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(5): 1182-1188.