

装备虚拟维修培训系统设计与实现

罗一丹¹, 王南松²

(1. 航天长征国际贸易有限公司, 北京 100071; 2. 上海精密计量测试研究所, 上海 201109)

摘要: 针对目前部队及相关军事院校对武器装备维修培训的需求, 结合虚拟现实技术的发展现状、系统结构特征设计了基于虚拟维修技术的装备维修培训系统总体方案; 对其中的三维模型设计、维修过程设计、碰撞检测、交互方式等关键技术进行了分析与研究, 实现了角色管理、虚拟维修演示与训练、维修信息记录等功能, 涵盖学习、训练、评估环节; 最后以某武器装置为对象对该系统进行实际应用, 结果证明可以满足用户在装备维修训练领域的需求, 可有效提高装备维修效率, 为装备维修培训提供了新的可行方法。

关键词: 虚拟现实; 维修过程; 人机交互

Design and Realization of Equipment Virtual Maintenance Training System

Luo Yidan¹, Wang Nansong²

(1. Aerospace Long-March International Trade Co., Ltd., Beijing 100071;
2. Shanghai Precision Metrology & Test Research Institute, Shanghai 201109)

Abstract: In order to meet the demand of the army and military colleges for maintenance training of weapons and equipment, and in combination with the development status of virtual reality technology, system structure characteristics designed equipment maintenance training system based on virtual maintenance technology. The key technologies of 3D design, maintenance process design, collision detection and interaction mode are studied. The functions of role management, virtual maintenance demonstration and training, maintenance information recording and so on are realized, which include learning, training and evaluation. Finally, the system is applied to a weapon device. The results show that the system can meet the needs of users in the field of equipment maintenance training, effectively improve the efficiency of equipment maintenance, and provide a new feasible method for equipment maintenance training.

Keywords: virtual reality; maintenance process; human-computer interaction

0 引言

装备故障维修是一项非常重要又十分繁琐的工作, 部队在这方面需要花费大量人力和财力。对装备实施维修训练, 有利于维修人员熟练掌握其结构及原理, 能显著提高维修效率, 保证装备战备完好性。尤其是最新研制的装备, 技术含量日益提高, 维修过程训练显得更加重要。传统训练模式存在诸多问题: 1) 装备结构复杂、维修训练成本高, 难以在实装上进行维修训练; 2) 目前采用多媒体教材、交互式电子技术手册等维修训练手段, 这些手段虽然在表现形式和查阅效率上上了一定的提升, 但没能摆脱维修人员只能通过被动学习的方式去理解缺乏实际操作, 严重影响了维修训练的效率。

随着虚拟维修技术日益成熟, 其广泛应用于装备数字设计制造、维修培训等领域中, 采用虚拟维修技术, 进行装备培训, 能有效地克服传统训练方式的不足, 提高学习效率, 降低费效比。国内空军工程大学防空反导学院梅朝、舒涛等人设计了武器装备虚拟维修训练系统^[1], 军械工程学院苏群星、刘鹏远等人开发了面向装备维修的虚拟拆卸系统^[2]。这些维修训练系统基本上是利用虚拟维修技术实现了维修过程

的再现, 但缺少学员和虚拟维修部件之间的交互控制, 以及对培训效果的记录, 不能对培训效果进行测评。

本文在虚拟维修技术研究的基础上开发了可以工程应用的装备维修培训系统, 课件具备内容演示、训练、考核等过程, 为实装培训提供了有效支持, 具备通用性。

1 装备虚拟维修培训系统需求分析

装备虚拟维修培训系统主要通过虚拟现实技术在计算机上复现装备的维修过程, 同时可以通过人机交互手段对维修过程进行模拟操作, 并可以对其过程进行记录评估, 已到达对维修器材、备件及过程熟练掌握, 提高用户在实装维修训练中的工作效率。系统需要具备以下功能。

1) 维修演示: 用户通过观看虚拟维修过程演示, 对维修过程中涉及的安全条件备品工具使用情况以及维修步骤进行了解, 为虚拟维修训练打基础。

2) 维修训练: 用户通过使用鼠标键盘等外设实现维修器材和工具的拾取, 并实现与维修部件的碰撞触发相应的维修步骤, 同时具备一定的维修过程提示功能, 使用户主动掌握完整的维修方法。

3) 维修过程记录: 能够对维修过程信息进行记录, 使用户能自我检验维修训练效果, 对所学内容进行深化和巩固。

4) 系统管理: 能够实现对维修科目的管理、角色管理以及用户管理等功能。

系统功能组成图如 1 所示。

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-04-23。

作者简介: 罗一丹(1983-), 女, 湖南桃源人, 硕士, 高级工程师, 主要从事军贸产品的综合保障系统设计方向的研究。

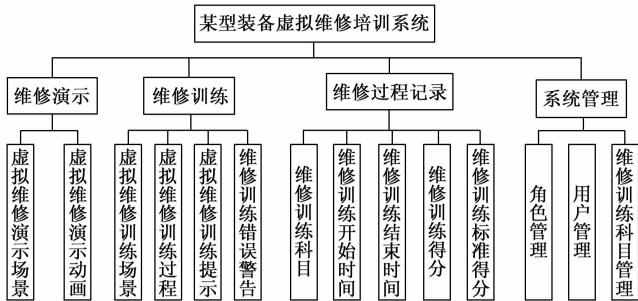


图 1 系统功能组成图

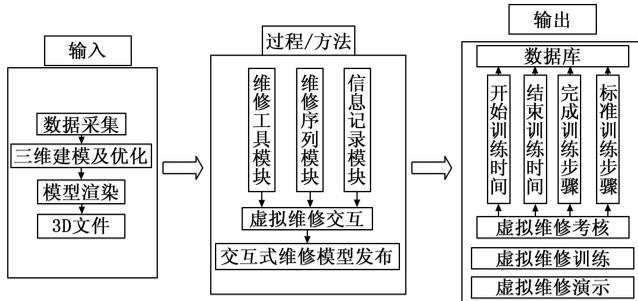


图 2 虚拟维修设计框架图

2 虚拟维修培训系统总体设计

虚拟维修培训系统的应用人群包括以下三类：第一类是装备操作及维护维修人员；第二类是装备保障方面的专家；第三类是系统运维人员。维修人员（即学员）主要是通过该系统对具体装备维修科目进行学习和训练。专家（即教员）主要是对系统中的维修科目进行指导和审核，确保训练内容正确性以及对学生训练结果进行评估。系统管理员主要是对系统进行维护，包括维修科目管理，用户的管理，用户训练信息的管理。

2.1 学员角色

学员在进行实际训练科目之前，根据自己的实际情况进行基础知识的学习，包括装备的理论知识、虚拟场景的漫游、各关键分系统的虚拟维修演示，之后进入系统虚拟维修训练部分在相关提示下对检修过程步骤及工艺手动操作进行反复训练。系统管理员会在学员自主训练结束后下达考核任务，并在考核结束后将考核情况整理发给专家进行评判。

2.2 教员角色

教员主要负责管理考卷，包括管理维修科目、分配考生、对学生的考核情况进行评判。

2.3 系统管理员角色

系统管理员主要负责管理学员、教员用户及相应的虚拟维修资源，并给相应用户分配权限。除了管理系统之外，系统管理员还需及时发现管理系统存在的缺陷，并将缺陷问题反馈给开发虚拟检修培训考核系统的技术人员。

3 虚拟维修设计方法

虚拟维修设计架构如图 2 所示，输入部分是三维模型的准备阶段，包括：素材准备、三维建模及优化、模型渲染；过程部分是虚拟维修的设计阶段，包括：维修工具的规划、维修过程序列化的规划以及维修过程的信息记录；输出部分是虚拟维修发布阶段，包括：虚拟维修演示、训练、考核三种模式，在训练/考核模式中可采集训练/考核开始时间、结束时间、已完成训练内容以及标准训练内容，并记录到数据库中。

3.1 三维模型设计

通过三维建模获得装备几何模型数据，同时利用虚拟引擎提供的文件输出功能转化为所需要的文件格式，然后在虚拟引擎中，通过数据简化，对几何模型的层级结构从

新进行划分，同时获得装配约束、部件的质量材质等基本信息，为虚拟维修交互式设计提供基础。为达到模型轻量化目的，本文提出双向多层次建模方法。A—向为高精度几何建模，该部分主要是在工业建模软件中实现，主要包括维修部件的各零件细节建模。B—向为低精度几何建模，该部分主要是在 3D MAX 中实现，主要从维修任务出发，对维修场景、维修对象、维修工具外形上进行建模，如图 3 所示。然后，通过烘焙的方法把高精度模型上的细节用贴图渲染出来，然后把渲染出来的贴图贴到低精度的模型上，使得低精度的模型外观有了高精度模型的细节效果。这样不但增强仿真效果，同时对几何模型达到了轻量化的目的，从而降低了虚拟仿真对计算机硬件的性能要求，提高了虚拟仿真的效率。

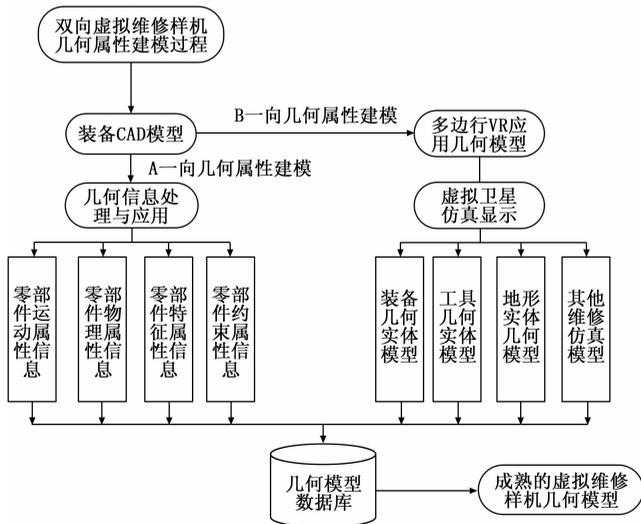


图 3 三维建模

3.2 虚拟维修过程设计

虚拟维修过程设计的重点是在维修工具、维修工序规划设计基础上如何开展合理的用户与虚拟场景交互，实现对场景中部件的操作，并通过信息记录模块记录维修过程数据。

维修工具模块主要实现针对不同的维修科目设计工具库，为每个工具设定唯一的 id，并与对应的三维模型关联，方便工具的调取。

维修序列模块主要实现按照一定的规则，合理规划维修序列的过程。在维修过程中要反复涉及到零部件的拆装，如果零部件较多，可供选择拆装组合就会特别多，可能会

出现拆装序列组合爆炸的问题。这些拆装组合都受到设备中零部件之间的位置关系、拆装关系以及零部件的约束关系的制约。因此维修序列模块在虚拟维修中的一个重要环节。本文采用基于 GB/T21654 - 2008《顺序功能图用 GRAFCE 规范语言》进行拆装过程建模, 它以 Petri 网格理论为基础, 采用图形表示, 用步与转换描述过程, 具有很强的逻辑描述和分析能力。GRAFCE 规范基本元素包括以下三种。

- 1) 表示组件拆装过程中, 当前组件所处状态。
- 2) 转换, 由一步到另一步, 转换由一条垂直于两步之间有向连接线表示, 在这个过程中需要对维修工具进行约束。常见转换模型如图 4 所示。

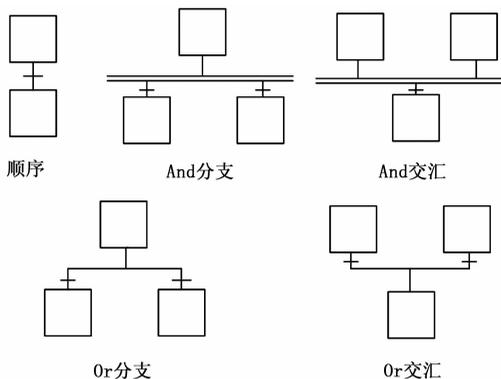


图 4 常见过程构型

- 1) 顺序: 表示当前拆卸状态完成即可进入下一个状态;
- 2) And 分支: 表示当前拆卸状态完成可以同时进入下几个状态;
- 3) And 交汇: 表示当前几个拆卸状态必须都完成才可进入下一个状态;
- 4) Or 分支: 表示当前状态完成可以进入以下几个状态中的其中一个;
- 5) Or 交汇: 表示当前几个状态有其中一个完成即可进入下一个状态。

这样步骤与步骤之间构成了条件_事件的关系, 即后一个操作是在前一个操作完成的基础上进行。

在虚拟维修过程中学员会出现误拿工具或者违反维修流程的操作, 因此在该过程设计中加入了违反维修流程时系统会报出错误提示。该功能点的设计原理是在条件_事件中加入错误提醒, 同时满足工具和标准序列条件时进入下一步操作, 否则调用错误提醒。此外, 为保证后续程序的正常运行, 在每步操作结束时应对触发条件进行归零设置。

3.3 交互方式设计

虚拟场景中的三维交互任务包括场景的控制、工具的选择和维修部件的操作。场景控制是指在场景中可对维修部件进行旋转、缩放和平移。工具选择是指可以通过人工在工具库中对工具进行选取。操作是指改变维修对象当前的状态, 主要是当前的位置关系。不论采用什么交互设备, 其交互手段都是服务于维修任务。虚拟维修训练系统中的

三维交互手段和命令应满足用户常规的操作习惯。维修训练系统的发布多集中在 PC 端上实现, 因此本文主要采取鼠标设备实现与虚拟场景的交互。主要过程如下:

首先通过鼠标拾取维修工具, 移动工具到达维修部位, 通过工具与零件的碰撞检测的定位维修零件。本文主要采取的是层次包围盒法实现物体之间的碰撞检测。主要原理是通过使用体积略大但几何特性简单的包围盒来近似描述各个维修零件通过对包围盒之间的相交测试来进行工具与维修零件间的检测, 此种方法比较典型的例子有轴向层次包围盒和方向层次包围盒等。

然后系统按照约束特征对工具和零部件进行匹配检测; 检测通过后, 系统调用维修序列模块中的信息, 确定工具箱零部件的连接状态;

最后激活拆卸动作, 并调用动画库中的特定的维修动画。交互过程如图 5 所示。

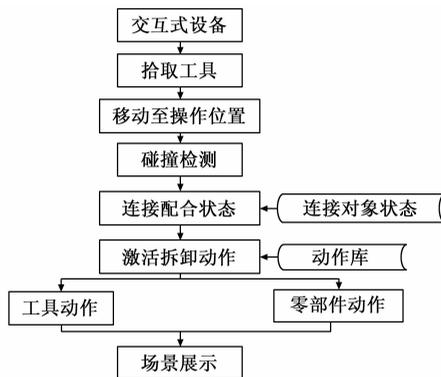


图 5 虚拟维修中的人机交互过程

3.4 信息记录模块

本文通过对虚拟维修训练过程信息进行记录, 通过对训练过程的记录不仅可以判断学员是否完成全部维修训练内容, 还可以对学员的维修技能的熟练程度进行评估, 提高训练质量。其方法是:

首先确定记录信息内容, 包括: 训练开始时间、训练结束时间、已训练完毕的步骤数、标准训练步骤数、训练科目名称。其中, 从维修部件类型的角度对维修项目中的操作步骤进行分类: 单个零件维修和多个重复零件维修。单个零件维修是指该零件在维修过程中只有一个, 装配方式独立, 从维修角度学员训练时需要维修经验的积累, 没有前例选择参照, 能直接体现出学员对该维修内容的熟练程度。多个重复零件维修是一个装配体中相同的两个或多个零件, 零件的装配关系完全相同, 几乎不要学员的维修经验, 只要会其中一个零件的维修即可完成重复零件的维修。根据上述分类可以得出下面的公式:

$$N = N_1 + N_2$$

其中: N 为维修训练的总的步骤数; N_1 为单个零件维修步骤数; N_2 为多个重复零件维修步骤数。通过这样定义维修步骤更能准确反应学员对维修项目的真实情况。

其次确立与数据库的传输协议, 本文定义的传输协议如下: "训练科目名称" + " " + 已完成训练步骤 + " " + 标准

训练步骤” + ” + 训练开始时间 + ” + 训练结束时间 + ”。在维修训练结束时将上述本次训练的数据传入数据库。

3.5 虚拟维修发布

虚拟维修发布包括演示、训练、考核三种模式：演示模式通过相应的动画展示装备的维修过程，达到学习的目的，该模式设计的重点就是将维修规划通过合理的动画展示出来。区别于演示模式，在训练模式中用户通过选取工具，然后与相关零部件进行碰撞检测，执行动画的形式。在此过程中具备逻辑判断，例如：选择错误工具时，在执行碰撞检测时，系统会自动报警，提示选用正确工具。维修顺序执行错误时，系统会自动提示顺序错误。受训人员可以实时查看操作提示，以便顺利完成训练过程。该模式设计重点是在维修过程规划基础上，通过维修工具和维修零部件的碰撞检测自动判断调取维修规划路径中的维修动画。区别于训练模式，考核模式中取消了帮助功能，完全依赖学员训练过程的熟悉程度进行考核。在训练/考核结束时可以记录本次信息，包括：训练/考核开始时间、结束时间、已完成训练/考核内容以及标准训练/考核内容、训练/考核维修科目名称。

4 实验结果与分析

以某发射系统的拉紧装置为例，对其日常的维修维护训练进行了实例应用，验证了系统的适用性。拉紧装置主要用于在行军过程中固定发射系统的作用是发射系统日常维护维修的重点，也是基层级维修人员必备的技能，因此该案例具备一定的典型性。

首先对该装置进行了三维建模以及场景绘制，同时为了在主流计算机上能够流畅运行该系统，还对场景进行了优化和改进。其次结合具体维修任务需求，建立维修过程模型，文中仅对其上盖维修过程进行了建模，其他维修过程不做赘述，如图 6 所示，第 1 步是准备工作，第 2 步开始进入维修操作，第 2 步与第 3 步间是无先后操作顺序，第 4/5/6/7 步执行前须完成 2/3 步，同时在维修过程中具有工具约束。

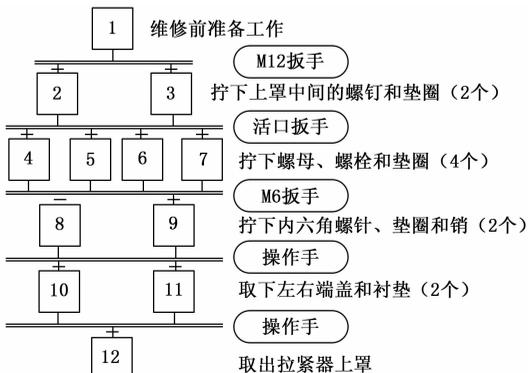


图 6 某部件维修过程 GRAFCE 模型

然后读入规划维修任务流程，按照维修流程管理相应的工具及步骤提示，并同步记录维修训练过程的数据。

最后对其进行了发布。维修过程演示如图 7 所示，通过相应按钮触发维修过程。维修过程训练如图 8 所示，通

过用户选择相应的维修工具与拉紧装置模型进行交互，触发相应的维修步骤。考核信息记录如图 9 所示，教员可根据该信息给出本次训练的评估效果。

通过本系统在某部队用户的应用，基本满足部队对装备维修教学训练的需求。通过虚拟维修技术设计的装备维修培训系统可逼真再现其结构，重要原部件的连接关系，在演示、训练、考核多种模式下对维修任务进行模拟。设计的虚拟维修场景直观、逼真、人机交互性强，可以对用户的维修水平进行考核，对培训效果起到提升和监督管理的作用。

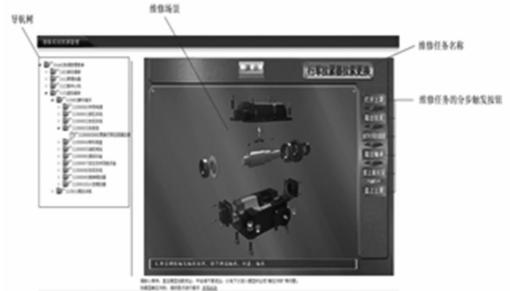


图 7 虚拟维修演示模式



图 8 虚拟维修训练模式



图 9 考核信息记录

5 结束

本文对装备虚拟维修培训系统进行了需求分析，结合需求对系统进行了系统设计，并对系统开发过程中的关键技术进行研究。系统实现的虚拟维修训练过程模型可拓展性强，可对维修任务繁多的装备进行科学管理，高效构建虚拟维修场景，在每一步的维修仿真中，系统具备逐步提示功能，并对维修步骤进行了记录，可有效对维修过程进行评估。以发射装置维护维修为实验对象验证了整个系统的可行性。