

# 分布式虚拟装配训练通用平台研究

王 巍, 瞿 扬, 李培林, 刘晓卫

(空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051)

**摘要:** 针对当前部队训练中存在大量协同装配训练的问题, 对基于系统通用性的分布式虚拟装配训练通用平台进行研究, 提出了平台的功能模块和体系结构, 研究了层次化装配体模型构建、基于运动副自由度规约的运动仿真、分布式虚拟训练以及碰撞检测等关键技术, 开发并实现了分布式虚拟装配训练通用平台; 实验结果表明, 该平台能够满足协同装配的训练需求, 且具有很好的通用性。

**关键词:** 装配训练; 分布式虚拟训练; 通用平台; 碰撞检测

## Research on General Platform for Virtual Assembling Training

Wang Wei, Qu Yang, Li Pei lin, Liu Xiao wei

(Air force Engineering University, College of Air and Missile Defense, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** To solve the problem that a great deal of assembling co-training exists in current troops, the general platform architecture and the function modules were analyzed. Put forward the function and structure of general platform. Several enabling technologies such as hierarchical assembling model, movement navigation technology, distribute virtual training, and real time collision. According to these technologies, the general platform was developed. Results indicated that this platform not only can meet the assembling co-training demands but also have strong generality.

**Key words:** assembling training; structure of distribute virtual training; general platform; collision detection

## 0 引言

随着虚拟现实 (Virtual Reality, 简称 VR) 技术的迅速发展, 虚拟现实系统在人工智能、模拟训练及图形仿真等方面都得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。同时, 也为新型武器系统的人员培训提供了一种新的训练方式<sup>[2]</sup>。

大量新型复杂武器系统的技勤训练过程往往需要多名人员协同完成, 对训练人员的专业素质和协同配合能力均有较高的要求, 目前大部分武器系统的复杂装配训练依然沿用传统训练的模式, 即理论学习和实装训练相结合的, 训练过程中容易造成装备的人为损坏, 传统训练模式存在耗时、费力、效果差、难以快速提升训练水平等严重问题<sup>[3-4]</sup>; 少部分武器系统针对复杂装配训练开发了相应的虚拟训练软件, 但软件开发往往是针对单一型号和专用功能, 使得虚拟装配训练系统开发存在系统通用性差、开发效率低、资源重用性以及系统扩展性差等问题<sup>[5-6]</sup>。

为此, 本文基于虚拟现实技术建立了具有很强通用性的分布式虚拟装配训练通用平台, 可实现多名训练人员的协同虚拟装配训练。

## 1 平台功能需求分析

新型武器系统的装配训练中往往涉及大量的武器装备, 训练过程需要多名训练人员协同完成装配任务。因此, 分布式虚拟装配训练通用平台中, 训练人员必须能够按照不同的训练号手身份登录, 且每名号手所完成的任务是不同的。当所有训练人员登录完成后, 每名客户端严格按照实际训练的流程, 协同

完成整个虚拟装配训练科目; 训练人员还要能够利用本系统完成对装配训练的原理、过程以及装备日常维护使用说明等理论知识的学习; 综上所述, 该平台必须具备以下几个方面的功能:

- (1) 利用 CAD 软件建立装配训练的装备模型文件构造和管理虚拟装备的装配与运动学层次关系, 以及对虚拟装配训练场景的创建与管理;
- (2) 训练人员能够按照不同训练身份登录虚拟训练系统进行协同虚拟训练;
- (3) 能够对训练人员进行训练任务和训练流程的规划;
- (4) 训练过程的动画录制和演示;
- (5) 辅助训练人员学习理论知识;
- (6) 训练过程中, 能够实时对虚拟装备进行碰撞检测;

## 2 平台结构设计

根据平台的功能需求分析, 结合现有的硬件环境, 采用标准化和模块化的设计方式, 使得平台具有很好的扩展性和通用性。每个模块的定义主要是依据平台的各项功能需求。虚拟装配训练通用平台的体系结构如图 1 所示。

该平台具有 6 大功能模块, 各模块的功能分述如下:

- 1) CAD 建模模块: 根据具体的装配训练, 利用 CAD 软件构造装备的三维模型, 创建能被系统识别的三维面片模型, 并将该模型导入系统。主要功能为: 转换模型格式以及对模型进行纹理贴图。
- 2) 训练帮助模块: 根据具体的装配训练, 为训练人员提供训练帮助, 主要包括: 提供待装配对象信息、装配任务以及在人员装配训练过程中进行信息提示, 引导训练进行。
- 3) 人机交互模块: 实现训练人员与虚拟装备的交互。主要包括: 用于虚拟场景控制的鼠标、键盘、数据手套等。
- 4) 虚拟训练模块: 根据具体的装配训练, 对训练人员进

收稿日期: 2013-10-21; 修回日期: 2013-12-29。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51075395)。

作者简介: 王 巍 (1974-), 男, 陕西长武县人, 博士, 副教授, 主要从事数字化设计与制造方向的研究。

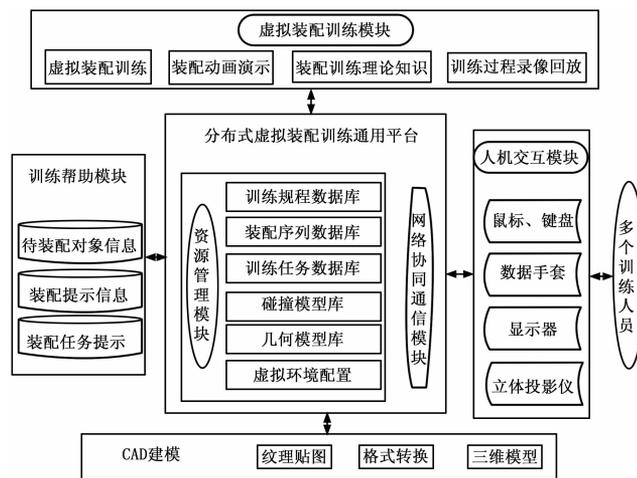


图 1 分布式虚拟装配训练通用平台结构

行虚拟装配训练。主要功能为: 介绍装配训练的理论知识、演示装配训练流程的动画, 提供虚拟装配训练环境、录制训练人员虚拟训练过程。

5) 资源中心模块: 根据具体的装配训练, 存储和管理装配训练过程中的数据信息。主要包括: 虚拟装备的几何模型库, 装配序列数据库, 训练任务数据库, 碰撞模型库, 虚拟环境配置等信息。

6) 网络协同通信模块: 解决多用户在协同操作过程中请求、监听、注册及信息传递等问题。客户端和服务端之间通过局域网传递的信息主要包括仿真信息、控制信息和协同信息。

### 3 关键技术研究

分布式虚拟装配训练通用平台的关键技术主要包括层次化装配体模型构建、基于运动副自由度规约的运动仿真、分布式虚拟训练技术及碰撞检测技术, 各技术的解决方案如下。

#### 3.1 层次化装配体模型构建

装配体模型主要包含装配体中各零部件实体以及它们之间层次结构关系和装配约束关系的各种信息, 以此保证装配任务能够顺利完成, 因此, 在构建零部件 CAD 模型的基础上还需要进一步建立零部件的装配体模型。虚拟装配训练通用平台采用一种层次化装配体模型, 利用此模型能够快速实现装配序列规划以及拆装动态仿真等功能, 该装配体模型主要包括以下 4 个方面的信息。

(1) 几何信息: 是指与产品的几何实体构造相关的信息。它反映了装配元件和整个产品装配体的几何形状和尺寸大小。

(2) 位姿信息: 是指装配零件在装配体坐标系中的位置信息和姿态信息, 可用  $4 \times 4$  的变换矩阵  $\begin{bmatrix} R & 0 \\ T & 1 \end{bmatrix}$  表示, 其中  $R$  是  $3 \times 3$  正定矩阵, 表示装配零件坐标系到装配体坐标系的姿态信息,  $T$  是  $3 \times 1$  矩阵, 表示装配元件坐标系到装配体坐标系的位置信息。

(3) 层次结构信息: 是指装配零件在装配体结构树中的位置信息。装配体的层次结构信息可以表达为  $\{C_1, C_2, \dots, C_i, \dots\}$ , 其中  $C_i$  表示装配体  $C$  的第  $i$  个子装配体,  $C_i$  可以是一个零件, 也可以是一个装配体。如果  $C_i$  为装配体, 则可将  $C_i$  进一步划分为  $\{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}, \dots\}$ 。如此进行下去, 直到

得到所有零件, 则  $C$  就构成了装配体的整个层次结构信息。层次结构信息是装配体模型层次结构视图的重要组成部分。

(4) 约束信息: 指产品装配体中零件与零件之间的约束关系。常见的约束关系有对齐、贴合、相切、插入、同向和坐标系重合等。

#### 3.2 基于运动副自由度规约的运动仿真

运动副是零部件之间相对运动的抽象模型, 在机械系统中存在大量的转动副和移动副两种运动形式, 据此, 平台通过构建运动副产生相应的自由度, 不同自由度之间相互耦合构建新类型的自由度, 实现运动件的运动仿真。运动副构造流程如图 2 所示。

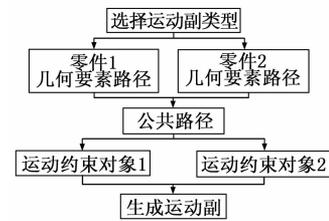


图 2 运动副构建过程

在虚拟场景中, 零部件的运动仿真实质是零部件的空间位姿矩阵变换。

在运动仿真中, 首先由运动副的类型和所包含几何要素得到运动自由度的类型、参考点以及运动方向。在移动副的运动仿真中, 根据输入的移动量计算运动件的每个坐标轴的移动分量  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , 进而计算移动变换矩阵  $M_{trans}$ , 获得初始位姿矩阵  $M_1$ , 实时计算移动后的位姿矩阵  $M_2$ , 完成移动副的运动仿真, 计算过程如下:

$$M_2 = M_1 \times M_{trans}$$

在转动副运动仿真中, 根据输入的转动量计算运动件绕局部坐标系转动的变换矩阵  $M_{rot}$ , 利用参考点和运动件当前位置计算平移变换矩阵  $M_{r-trans}$ , 初始位置矩阵为  $M_1$ , 计算转动后的位姿矩阵  $M_2$ , 完成转动副的运动仿真, 计算过程如下:

$$M_2 = M_1 \times M_{r-trans} \times M_{rot}$$

#### 3.3 分布式协同虚拟训练技术

分布式虚拟装配训练通用平台必须满足多名人员协同进行虚拟装配训练的要求。

##### 3.3.1 分布式结构

针对虚拟装配训练的协同特点, 平台采用基于客户端/服务器 (C/S) 模式的分布式协同虚拟训练平台, 该协同虚拟训练平台由若干台计算机通过局域网相连, 其中 1 台高性能计算机作为服务器, 运行服务器端软件, 其余 3 台普通计算机作为客户端, 均运行客户端软件。在训练过程中, 根据训练任务的不同, 将由训练人员利用客户端完成训练任务; 服务器主要是完成训练场景构建、管理, 管理用户以及用户的任务权限, 实时碰撞检测, 模型位置、位姿计算, 及管理用户的训练数据等工作。平台总体结构如图 3 所示。

##### 3.3.2 协同网络通信

在虚拟装配训练平台中, 服务器和客户端之间通过 TCP/IP 协议进行通信。为了保证服务器和客户端之间的同步, 必须使网络延迟小于人眼可分辨的最低值 200ms。为了解决以上问题, 系统采用了基于 Windows 底层的 Winsock 类来实现

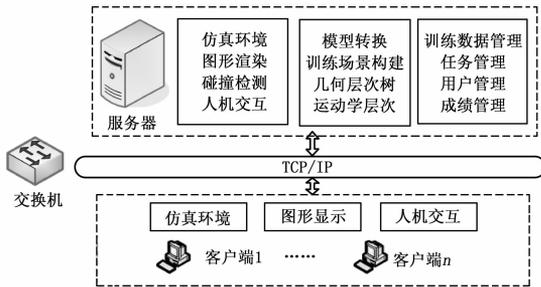


图 3 分布式协同虚拟训练平台总体结构

TCP/IP 协议。系统结构如图 4 所示。

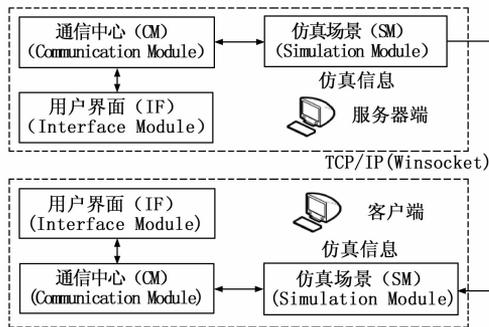


图 4 基于 Winsock 的通信协议

这种方法通过为客户端的仿真场景模块添加一个接受消息的循环线程函数，有效地避免了消息发送过程中的冗余步骤，降低了消息发送过程中的延迟，提高了客户端的响应效率。经实验，这种通信方法的延迟在 80~100 ms 之间，小于人的视觉分辨值。

### 3.4 碰撞检测技术

碰撞检测技术是虚拟现实系统开发中不可避免的问题之一，分布式虚拟装配训练通用平台采用基于 OBB 包围盒<sup>[7]</sup>的碰撞检测算法，首先利用 OBB 包围盒进行碰撞检测的粗略测试，然后将检测到的碰撞部位使用三角形网格分解的方法进行精细碰撞检测。该算法流程如图 5 所示。

步骤 1：初始化“碰撞场景”。根据虚拟场景中面片模型生成碰撞模型的碰撞场景，碰撞场景仅在后台进行实时碰撞检测，并与虚拟场景保持同步运动。

步骤 2：OBB 包围盒的粗略碰撞检测。虚拟场景中利用均值和协方差矩阵统计量来计算每一个零部件的 OBB 包围盒的位置和方向<sup>[8]</sup>。进行粗略碰撞测试时首先对 OBB 包围盒进行快速相交测试，然后对包围盒重叠的模型采用三角网格划分算法进行三角面片模型的精细碰撞测试。

步骤 3：三角面片模型的精细碰撞检测。对面片模型采用三角网格分解，然后计算三角网格是否相交。如果三角形网格相交，则两个模型发生碰撞；如果没有三角形网格相交，则两个模型没有发生碰撞。

为了提高计算效率加快运行速度，实时进行碰撞检测，同时采取如下 3 个解决办法：

(1) 在载入“碰撞场景”时，仅对可能发生碰撞的物体生成碰撞模型，而其余不可能发生碰撞的模型将不做任何碰撞处理；

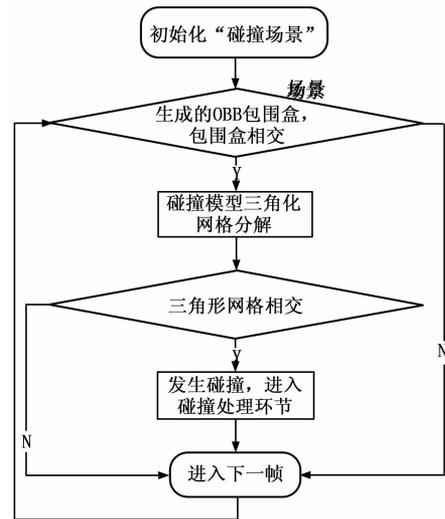


图 5 混合碰撞检测算法流程图

(2) 每次进行虚拟装配训练时，平台仅激活可能发生碰撞的碰撞检测对，以尽量减少平台不必要的计算；

(3) 平台只检测已激活的碰撞检测对，并且当碰撞检测对发生碰撞后立即停止运动，不能穿透物体。

## 4 系统实现

基于 Visual C++ 编程语言，结合 OpenSceneGraph (OSG) 图形显示引擎<sup>[9]</sup>，并以 Access 为数据库平台，开发了分布式虚拟装配训练通用平台。

某型导弹武器系统需要两人协同完成导弹的装配任务，基于此平台实现该型导弹的虚拟装配训练，如图 6 所示是以服务器端全局视角展示的导弹装配训练过程。1) 初始化，载入训练场景，如图 6 (a) 所示；2) 装配导弹前弹身部件，如图 6 (b) 所示；3) 装配导弹发动机，如图 6 (c) 所示；4) 装配导弹尾翼，如图 6 (d) 所示；5) 装配导弹弹翼，如图 6 (e) 所示。

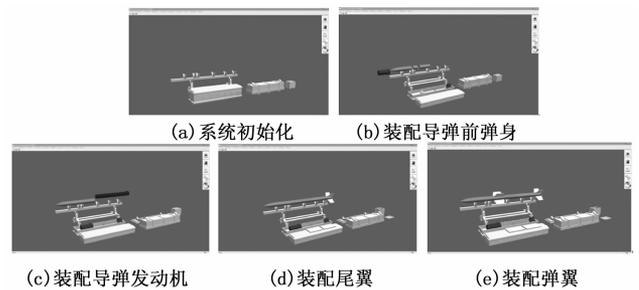


图 6 导弹虚拟装配训练

仿真结果表明：分布式虚拟装配训练通用平台完全能够满足该型导弹协同装配的训练需求，并且平台具有很好的通用性和资源重用性。

## 5 结论

本文基于 VR 技术设计开发了分布式虚拟装配训练通用平台，初步实现了通用性以及资源重用性的要求，在缩短虚拟装配训练系统的开发周期、节约经费、提升管理水平方面具有重要的意义。但随着武器装备的发展，面对更加复杂的协同装配

(下转第 1952 页)

求操作；(3) 若发现 USB 空闲置位，则调用 TD\_Suspend () 挂起函数，直到出现 USB 远程唤醒信号，调用 TD\_Resume () 函数，内核唤醒重新进入 while 循环<sup>[5]</sup>。

为简化固件编程，Cypress 为用户开发 FX2 提供了一个固件函数库 Ezusb.lib 和固件编程框架 Framework。在此基础上，对于一般的固件开发，用户只需修改少量即可，用户不必在熟悉 USB 协议、FIRMWARE 编程上花费太多时间，大大简化了固件的开发过程。在本设计中需要修改的函数包括：(1) 初始化函数 TD\_Init ()，上电后执行一次。在这个函数里，完成初始化的配置工作，如时钟频率、工作模式、端点配置、端口使能等；(2) 由于 68013A 要响应计算机下发的读数命令，因此在这里还需要厂商请求函数，来使能 PA0 管脚。另外，68013A 工作在 Slave FIFO 模式下，不需要 8051 内核参与，用户任务函数 TD\_Poll () 函数代码为空。TD\_Init () 函数、DR\_VendorCmd (Void) 函数部分代码及注释如下：

```
void TD_Init( void )
{
    CPUCS = 0x12; //CPU 工作时钟设置 48MHz
    IFCONFIG = 0xe3; //使用外部时钟,Slave FIFO 模式
    OEA|=0x01; //使能 PA0 口
    PA0=0;
    SYNCDELAY;
    EP2CFG=0xe8; //设定为四缓冲,每个缓冲区大小为 512 字节
    .....
}

BOOL DR_VendorCmnd( void )
{
    switch (SETUPDAT[1])
    {
        case VEND_RSTDEVICE://启动数据传输
        {
            EP0BCH = 0;
            EP0BCL = 0;
            PA0=1; //PA0 口置高
            EP0CS |= bmHSTNAK;
            break;
        }
        .....
    }
}
```

(上接第 1946 页)

训练，平台的体系结构、相关的关键技术、软件工具以及硬件设备等方面均需要进一步的研究。

参考文献：

[1] 胡小强. 虚拟现实技术基础与应用 [M]. 北京：北京邮电大学出版社，2009：35—37.  
 [2] 丁俊杰，米双山，等. 机械设备虚拟维修样机在虚拟环境中的实时移动 [J]. 计算机测量与控制，2011，19 (12)：3075—3079.  
 [3] 卢忠诚，李翔，宋代祥. 外军虚拟实验 (训练) 技术与装备发展研究 [R]. 中国国防科学技术报告. 2008. 12：71—129.  
 [4] 袁华. 训练模拟系统发展现状及启示 [J]. 国防科技，2009

4 实验结果分析

在实际测试中，数据控制传输系统通过 200 m 长的平衡电缆对弹载存储系统进行控制。弹载存储系统存储逻辑中存储的测试台发送的数据为以 05 0C DF 为帧头，EB 90 为帧尾的 16 进制递增数。计算机终端显示的数据控制传输系统接收到的递增数如图 5 所示。测试结果表明，接收数据正确无误，满足任务要求。

000007F5H	05	0C	DF	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F
00000805H	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1A	1B	1C	1D	1E	1F
00000815H	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	2A	2B	2C	2D	2E	2F
00000825H	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	3A	3B	3C	3D	3E	3F
00000835H	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	4A	4B	4C	4D	4E	4F
00000845H	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	5A	5B	5C	5D	5E	5F
00000855H	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	6A	6B	6C	6D	6E	6F
00000865H	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	7A	7B	7C	7D	7E	7F
00000875H	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	8A	8B	8C	8D	8E	8F
00000885H	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	9A	9B	9C	9D	9E	9F
00000895H	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	AA	AB	AC	AD	AE	AF
000008A5H	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	BA	BB	BC	BD	BE	BF
000008B5H	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	CA	CB	CC	CD	CE	CF
000008C5H	D0	DA	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	DA	DB	DC	DD	DE	DF
000008D5H	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	EA	EB	EC	ED	EE	EF
000008E5H	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	00	29	D5	08	EB	90

图 5 计算机显示系统传输的递增数

5 结论

本文围绕对弹载存储系统的远距离控制和数据高速传输展开研究，提出了以 FPGA 为控制核心，LVDS 芯片组和 68013A 作为受控对象的数据控制传输系统。测试结果表明系统工作稳定，性能可靠，具有一定的实用性。

参考文献：

[1] 张文栋. 存储测试系统的设计理论及其应用 [M]. 北京：高等教育出版社，2002.  
 [2] 任家富. 数据采集与总线技术 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2008.  
 [3] 来为国. 10 位 BLVDS 串化器 DS92LV1023 和解串器 DS92LV1224 的原理及应用 [J]. 国外电子元件，2008，(8)：45—47.  
 [4] 史玉健，任勇峰，李景辉，等. 基于 Flash 的高速数据记录器的研究与设计 [J]. 计算机测量与控制，2011，19 (12).  
 [5] 钱峰. EZ—USB+FX2 单片机原理、编程及应用 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2006.

(1)：62—65.

[5] 王上军，时和平，窦云杰. 某装备虚拟维修训练系统设计与实现 [J]. 兵工自动化，2009，28 (9)：11—14.  
 [6] 方传磊，苏群星，等. 导弹装备虚拟维修训练系统通用平台 [J]. 计算机工程，2009，35 (3)：274—277.  
 [7] 李成景，王洁，肖强明，等. 三维视景仿真的包围盒碰撞检测算法优化 [J]. 电视技术，2011，35 (17)：122—125.  
 [8] 王伟，马峻，刘伟. 基于 OBB 包围盒的碰撞检测研究与应用 [J]. 计算机仿真，2009，26 (9)：180—183.  
 [9] 王锐，等. OpenSceneGraph 三维渲染引擎设计与实践 [M]. 北京：清华大学出版社，2009，11.