

8-3-2020

Design & Implement on Virtual Scheduling System of Great Square Art Performance

Lv Desheng

School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Guo Yan

School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, 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 & Implement on Virtual Scheduling System of Great Square Art Performance

Abstract

Abstract: The work of great art performance in square has a great deal of dynamic visual effects scenes, which combines with formation variation, beautiful music, unique clothing and colorful light. *According to the requirements of improving efficiency for scheduling section in handwork performance such as inefficient manual drawing, time-consumed and costly rehearsal*, it is an effective way to use technology of computer simulation so as to implement real-time and dynamic intermediary platform among performer, director and audience. To meet various demands in practice, a vision-based formation generation was proposed that the path construction was studied based on linear fitting, pivot rotation and curve-following theory. The virtual crowd motion control method combined with the strategies of key frame, logic group management and pre-generated control path of virtual agents, which was applied in the design and rehearsal work and showed valuable significance.

Keywords

great square art performance, virtual scheduling, path construction, motion control

Recommended Citation

Lv Desheng, Guo Yan. Design & Implement on Virtual Scheduling System of Great Square Art Performance[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(8): 1895-1901.

采掘运装备虚拟装配与仿真系统设计与关键技术研究

谢嘉成^{1,2}, 杨兆建^{1,2}, 王学文^{1,2}, 王义亮^{1,2}

(1. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024; 2. 煤矿综采装备山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: 针对煤机装备从设计、制造再到实际工作环境各环节相脱离问题, 以采煤机、刮板输送机、掘进机和提升机为研究对象, 以集成化双通道柱幕系统作为硬件支持, 以 Visual Studio 和 Open Scene Graph 作为系统软件平台, 集成了力反馈器、数据手套等人机交互设备, 实现了由虚拟装配子系统、场景仿真与漫游子系统等四部分组成的虚拟装配与仿真系统, 虚拟再现了煤炭生产过程中设备的运行状态, 为产品设计提供了直接形象的现场感和全新设计模式。该系统具有良好的沉浸性和交互性, 提高了产品的可装配性和研发效率, 降低了设计成本, 实际运用效果显著。

关键词: 采掘运装备; 虚拟装配; 虚拟仿真; 场景交互

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 04-0794-09

Design and Key Technologies of Virtual Assembly and Simulation of Mining, Driving and Transporting Equipment System

Xie Jiacheng^{1,2}, Yang Zhaojian^{1,2}, Wang Xuewen^{1,2}, Wang Yiliang^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Fully Mechanized Coal Mining Equipment, Taiyuan 030024, China)

Abstract: For there was no connection among coal mine machinery equipment design, manufacture and its actual work environment, virtual assembly and simulation system, consisting of virtual assembly subsystem, scene simulation and roaming subsystem etc., were realized ultimately, which took shearers, scraper conveyor, roadheader and hoister as the study objects and were supported by double channel prop scene system as the hardware and Visual Studio and Open Scene Graph as the software platform, integrating force feedback, data gloves and other human interface devices, virtual assembly and simulation system made equipment operating status visible in the process of the coal production. In this way, a direct work-filed sense and a new design mode could be provided for the product design. Virtual assembly and simulation system has good immersion and interaction performance, improves products assemblability and its development efficiency and reduces the design cost.

Keywords: mining; driving and transporting equipment; virtual assembly; virtual simulation; scene interaction

引言

于润沧院士指出:矿业开采要走数字化矿山之



收稿日期: 2014-03-27 修回日期: 2014-06-04;
基金项目: 山西省“十二五”科技重大专项 (20111101040); 山西省基础条件平台项目 (2014091016); 山西省高等学校创新人才支持计划 (2014);
作者简介: 谢嘉成(1989-), 男, 山西晋城, 硕士生, 研究方向为机械系统虚拟现实; 杨兆建(通讯作者 1955-), 男, 河北高阳, 教授, 博导, 研究方向为机械现代设计方法、机械 CAD/CAE、机械故障诊断等; 王学文(1979-), 男, 山西长治, 博士, 副教授。

路, 主要分为 3 个阶段。其中第 2 个阶段是虚拟矿山, 就是“把真实矿山的整体以及和它相关的现象都能够继承起来, 数字化体现出来, 变成虚拟的东西, 这样可以了解整个矿山当前动态的运作和发展情况”^[1]。在国际上, 目前针对虚拟矿山的研究, 主要有澳大利亚科学及工业研究院(CSIRO)建立了综采工作面培训系统^[2]; 美国的 T J Orr 等设计了能够同时对四个矿工进行培训的矿山逃生系统^[3]; Dr

Jennifer Tichon 等建立了评判当前主流的煤矿安全培训系统的评估准则, 并进行了试验认证, 证明煤矿安全培训系统确实对提高矿工的安全意识有着重要的意义^[4]。而在国内, 针对这方面的研究主要有西安科技大学^[5]、河南理工大学^[6]、中国地质大学^[7]等运用虚拟矿工对煤矿井下的典型事故, 透水、火灾、瓦斯爆炸等进行仿真; 太原理工大学^[8]、山东科技大学^[9]、西安科技大学^[10]等都在综采工作面或者综掘工作面场景仿真方面有积极探索。

虚拟装配越来越受到世界各国的重视, 而运用先进的人机交互手段辅助装配已经成为新的发展趋势, J M Ritchie 等实现了基于力觉触觉的虚拟装配系统^[11]。而在国内, 把虚拟装配真正应用于煤机装备的研究却很少, 主要有吉林大学^[12]和辽宁工程技术大学^[13]分别对掘进机截割头和刮板输送机

的虚拟装配, 这些都仅仅局限在用 CAD 软件实现而未真正涉及虚拟装配的核心——人机交互。

本文正是基于以上 2 个方面, 针对煤机装备中重要部分——采掘运装备从设计、制造再到实际工作环境中各环节相对脱离的问题, 研究了采掘运装备虚拟装配和仿真系统的开发方法, 为采掘运装备产品的设计研发提供技术支持。

1 系统构架设计

1.1 体系结构

本系统体系结构如图 1 所示, 由 4 部分组成: 虚拟装配子系统、场景仿真与漫游子系统、虚拟手人机交互子系统和力反馈人机交互子系统。

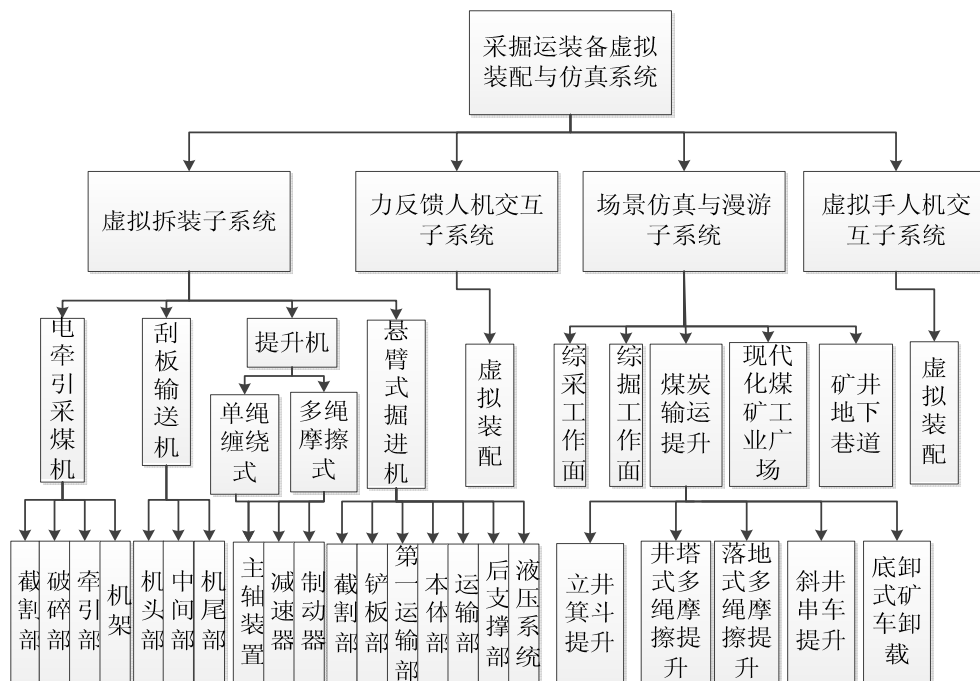


图 1 系统体系结构

1.2 硬件系统设计

根据系统需求分析, 搭建集成化双通道柱幕系统视景平台, 该系统的硬件部分主要有输入设备和输出设备两部分组成。

输入设备: 鼠标、键盘、数据手套、力反馈器、位置跟踪器等。

输出设备: 数字图形边缘融合器、柱形投影屏幕、立体声音响、数据头盔、立体眼镜等。

系统视景平台如图 2 所示。

1.3 软件系统设计

系统以 Visual Studio 为编译平台, 基于 C++ 语言, 利用 OSG(Open Scene Graph)和 CEGUI 开源函数库。软件系统设计及关键技术如图 3 所示。

1.4 MFC 开机界面设计

由于本系统子模块很多, 为了使用户可以方便、快捷的找到并进入自己所需要的模块, 兼顾美观性和协调性, 利用 mfc 设计软件开机界面。

分别设计 4 个以 MFCDlg(即对话框框架)为基础的开机界面, 例如虚拟装配模块具有采煤机、刮板输送机、掘进机和提升机 4 个子模块, 旁边辅以相应插图, 下面设置“进入”按钮, 点击按钮即可进入相对应的模块, 如图 4 所示。然后利用 TabControl 控件把 4 个界面集成到一个大的界面上, 鼠标单击就可以实现 4 个子界面的快速切换, 从而使用户方便快捷的进入系统。

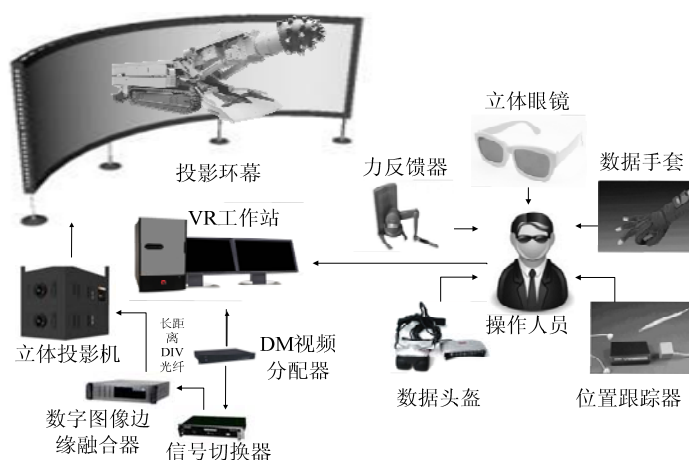


图 2 采掘运装备虚拟装配与仿真系统视景平台

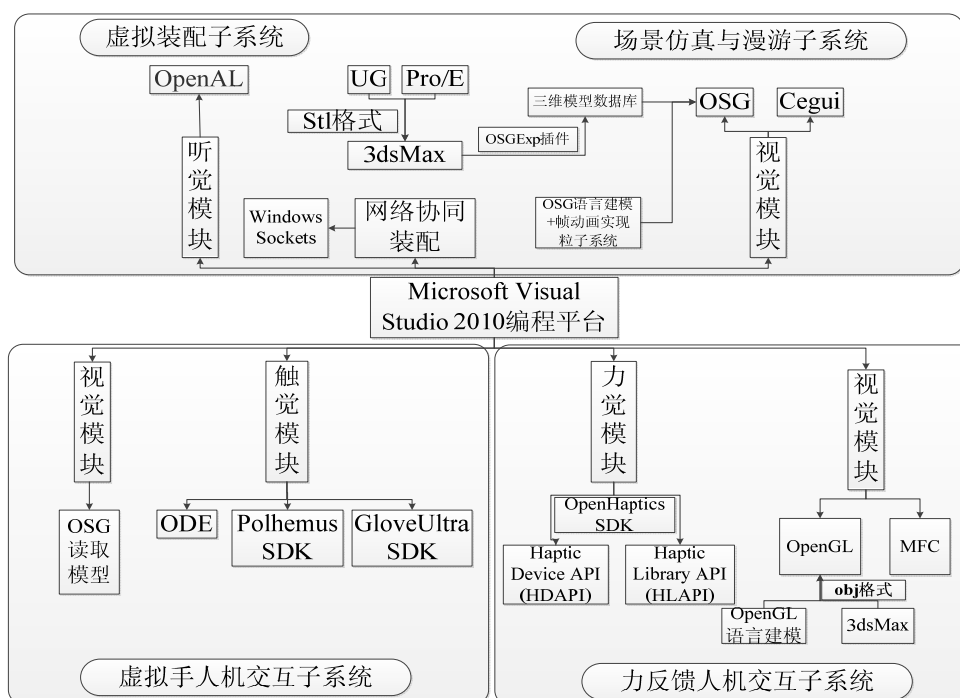


图 3 软件系统设计及关键技术



图 4 开机界面(虚拟装配子系统画面)

2 系统关键技术及功能设计

系统主要包括虚拟装配子系统、场景仿真与漫游子系统、虚拟手人机交互子系统和力反馈人机交互子系统。

2.1 虚拟装配子系统

关键问题: 采掘运装备部件零件众多, 系统又具有模型操纵模块、自动演示模块、路径记录与回放模块、自动辅助说明模块和协同装配模块等多个功能, 将这些融合为一个有机整体, 并合理组织场

景资源, 为用户提供方便简单的操作与功能界面是本部分的关键所在。

采用的技术: 利用 OSG 的树状结构进行场景管理, 一颗场景树包括一个根节点、多级内部的枝节点, 以及多个末端的叶子节点。根节点和枝节点负责建树的层次以及完成某些特定功能, 而叶子节点则保存了一个或多个可绘制对象的信息^[14]。结合使用 CEGUI 为用户提供简单的操作界面。

系统场景树如图 5 所示, 对应着以下功能:

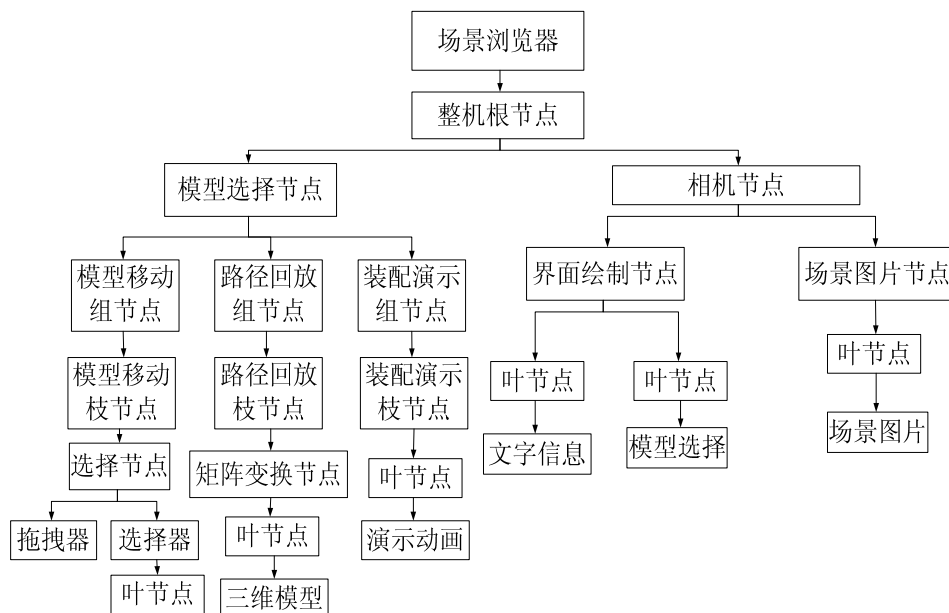


图 5 采掘运装备虚拟装配系统场景树图

2.1.1 模型操作模块

对模型的选择性操作, 是利用 `osgManipulator`

库中拖拽器 `Dragger`^[14] 改变操控模型节点的变换矩阵来改变物体对选中的物体进行平移、缩放和旋转操作。

2.1.2 自动演示模块

在 3DMAX 中, 将帧数以 50 为基数逐个添加每一个模型正确的装配位置, 制作正确的模型装配路径动画, 导出 osg 或 ive 格式, 然后加入到相对应的装配演示节点。

2.1.3 路径记录与回放模块

在 OSG 中利用类 `osg::AnimationPath` 类和 `osg::AnimationPathCallBack[14]` 类来实现对路径的记录与回放模块。用户操作所产生的路径会存放在指定的 txt 文件中, 而当路径回放时, 会利用 `UpdateCallback` 函数对先前保存的 txt 文件进行读取实现回放功能。

2.1.4 自动辅助说明模块

在用户对选择的模型进行操作的同时, 会自动激活对本模型辅助说明的 Cegui 窗口, 清晰而又明了的呈现了该模型的概念、功能以及使用方法等。

2.1.5 协同装配模块

利用 windows sockets(套接字)来实现异地实时协同装配功能。首先运行服务器端监控程序, 在服务器和客户端分别输入 IP 地址连接监控程序, 成功后, 就可以进行网络通信。操作模型的一方会将其操纵模型的位置信息通过套接字实时传递给另一方, 而另一方接收到信息后就会通过节点访问器 (`osg::NodeVisitor`)^[14] 访问相对应的模型并对其进行位置变换, 从而达到网络协同装配的目的。两方只能有一方获得操作权限, 否则会造成不确定性并出现错误。对一个 `Mutex` 进行加锁, 则避免了这种错误:

```
EnterCriticalSection(&Critical_Section);  
LeaveCriticalSection(&Critical_Section);
```

2.2 场景仿真与漫游子系统

对煤矿采掘运中的典型场景进行分析, 分为四大模块: 综采工作面、综掘工作面、煤炭运输与提升过程和现代化煤矿地上与地下总模型。运用两种设备进行图像接收, 可以选择用立体眼镜观看环幕

或者使用数据头盔 3D Visor 感受所对应的场景, 了解设备运行状况和典型工艺流程。

关键问题: 该部分场景组成复杂, 各种机型之间有准确的配套关系, 部件与部件之间有精确的运动关系, 合理组织场景, 按照上述要求准确制作动画就成为了本部分的关键问题。

采用的技术: 采用 3DMAX 帧动画与 OSG 编程语言相结合的动画制作方式, 解决上述问题。在 3DMAX 中利用帧动画、父子链接、样条线 IK 修改器以及在 OSG 中直接操纵已有模型和建立煤炭粒子效果, 使动画更加逼真。以综采工作面为例, 设计过程如下:

2.2.1 综采工作面作业方式分析以及场景布置

综采工作面的工艺过程包括采煤、装煤、支护及工作面端头作业和进刀等几部分组成。采煤、装煤由采煤机割煤时完成, 运煤由刮板输送机、桥式转载机和胶带输送机完成, 工作面的支护和处理采空区通过液压支架的移架完成。分析综采工作面工艺流程将其简化并建立数学仿真模型。

2.2.2 对设备进行建模以及单个物体的运动仿真

在 UG, Pro/E 中分别建立各个模型, 并按照设计图布置在场景中; 把所有模型导入 3DMAX 中, 建立各部分运动层次, 以采煤机为例, 机架属于最高级, 截割部、破碎部、行走部、油缸属于第 2 层次, 摇臂和滚筒属于第 3 层次, 建立父子关系(父物体运动影响子物体, 而子物体运动不影响父物体), 最终使采煤机达到前后滚筒可以在油缸的控制下上下摆动完成割煤。而对于刮板输送机刮板链的运动, 则运用样条线 IK 修改器完成运动仿真。

2.2.3 建立煤流的粒子系统模型

由于 3DMAX 的粒子模块导入 osg 中出错, 所以直接利用 OSG 建模语言结合 3DMAX 帧动画建立煤炭粒子系统, 完成粒子运动过程。

2.2.4 设计漫游方式

根据实际矿井的场景, 建立逼真的虚拟矿井三

维模型,实现对虚拟场景的实时驱动,进而实现可控制漫游和自动漫游 2 种漫游方式。在可控制漫游方式下,漫游者可以随意改变观察的视角和位置;在自动漫游方式下,系统根据设定好的路线自动漫游。

2.2.5 综采工作面声音仿真

建立综采工作面的声音文件,可以真实的模拟综采工作面的声音环境,提高系统的沉浸性。

2.2.6 综采工作面工艺流程虚拟现实仿真

集成前面的各项工作,建立一个逼真的综采工作面采煤过程。从采煤机进刀、回采、配合液压支架支护、推溜以及煤炭掉落和运输过程就基本构建完成,形象的反映综采工作面的工作情况。

2.3 虚拟手人机交互子系统

在该系统中,虚拟手和人手之间的动作通过数据手套进行调整。用户可通过虚拟手代替人手对虚拟零部件模型进行操作,并从虚拟环境中得到信息反馈,从而实现真实环境与虚拟环境的交互体验。

关键问题:深刻理解并掌握数据手套和位置跟踪器的原理与建立两者配合使用的函数关系,并能在 OSG 环境下进行应用。

采用的技术:记录各模型的初始位置与正确装配位置坐标,运用特定方法判定是否可以对模型进行操作,实时获取被操纵模型的位置,与正确位置坐标进行判断,判断结果在约束范围内,模型就可以自动装配到正确位置。

2.3.1 数据手套抓取物体判定方法

数据手套的每根手指背部有 2 个弯曲传感器,传感器数据与手指的弯曲角度有以下线性关系:

$$\theta_i = (\theta_{\max} - \theta_{\min}) N_{\text{out}} / R_{\text{val}} \quad (1)$$

式中: θ_i 为第 i 根手指的弯曲角度; $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$ 为最大最小弯曲角度; N_{out} 为传感器校准数据; R_{val} 为传感器测得数值。

虚拟手模型简化为 1 个手掌和 5 根手指,除大拇指外的其余手指又分为 3 个指关节(大拇指有 2 个指关节),接触物体的规则采用射线求交的方法,

每根手指包含 1 条射线,当有手指的射线与零部件的包围球相交时,即为接触到物体;是否抓取物体根据人手的运动规律判断,假设手为一水平面,当包含大拇指在内的两根以上手指进行弯曲至整个平面的 $2/3$ 以下时,即为抓取到物体;释放物体与接触物体相反。

2.3.2 实时获取被操纵模型坐标

位置跟踪器确定了虚拟手在三维空间中的位置和姿态。

将位置跟踪器以及数据手套中传感器测得的数据转化为虚拟场景中虚拟手的变换矩阵,对于系统每一帧刷新,数据手套根据变换矩阵来驱动虚拟手的变换。

将一坐标系下定点 V 变换成另一坐标系下 V' , 需要将各坐标系下变换矩阵依次相乘, 如:

$$V' = V \cdot M_n \cdot M_{n-1} \cdot \dots \cdot M_1 \cdot M_0 \quad (2)$$

位置变换利用矩阵的逆乘即可得到:

$$V = V' \cdot (M_n \cdot M_{n-1} \cdot \dots \cdot M_1 \cdot M_0)^{-1} = V' \cdot M_0^{-1} \cdot M_1^{-1} \cdot \dots \cdot M_{n-1}^{-1} \cdot M_n^{-1} \quad (3)$$

角度姿态的变化由 $a^\circ \rightarrow b^\circ$, 右乘矩阵

$$d = a^{-1} \cdot b = \frac{a^*}{\|a\|} \cdot b \quad (4)$$

2.4 力反馈人机交互子系统

使用 phantom desktop 作为力反馈设备,可以使操作者通过反馈力感受虚拟模型的特征、约束和交互状态等,从而约束和引导操作者与虚拟环境进行实时交互^[15]。

关键问题:深刻理解力反馈器的原理、在 OpenGL 环境下读取三维模型以及触觉和视觉渲染两个线程的同步问题。

采用的技术:prt 文件以 stl 格式导入 3DMAX 中,然后导出 obj 格式,编写 OpenGL 读取 obj 文件的程序,模型就可以在 OpenGL 中显示。采用 HLAPI 结合 HDAPI 的方式进行开发解决触觉和视觉两个线程同步的问题。

2.4.1 力反馈器操纵模型原理

操作者操作末端手柄, 控制力觉/触觉接口点 (HIP, Haptic Interface Point) 在设备工作空间中运动, 空间匹配模块将 HIP 的位姿通过空间匹配算法映射为虚拟环境中的代理(proxy)点的位姿。

1 个虚拟交互过程通常至少包括 3 个阶段: 拾取、改变位姿、释放。如果当前代理点与某个虚拟模型发生碰撞, 并且操作者按下了 PHANTOM 手臂上的按钮, 则该虚拟模型被拾取, 成为当前被操作的零件; 当操作者松开 PHANTOM 手臂上的按钮时, 当前被操作的零件将被释放到当前位置。

2.4.2 触觉与视觉渲染模式

OpenHaptics 是 sensible 公司提供的 1 个开放式力觉/触觉渲染软件设计平台, 包含 2 个函数库, 一个是 HLAPI(Haptic Library API) 和 HDAPI(Haptic Device API)。

HDAPI: 低层次的基础层的触觉接口, 没有图形, 需要了解触觉渲染机制;

HLAPI: 高层次的触觉场景渲染, 建立在 HDAPI 顶部, 针对对 OpenGL 熟悉、但是不太熟悉的触觉渲染的人;

本模块采用 HLAPI 结合 HDAPI 的方式进行开发, 程序框架如图 6。

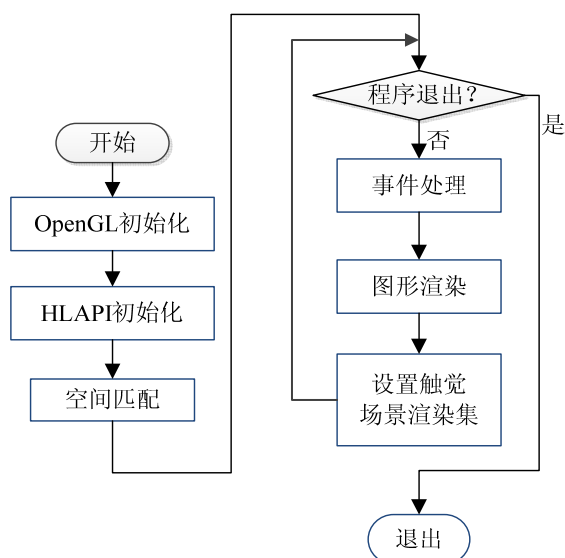


图 6 HLAPI 主线程框架

2.4.3 部分关键代码

首先导入 3D 模型.obj 文件

```
pmodel = glmReadOBJ("obj/chilun1.obj");
```

```
glmUnitize(pmodel);
```

```
glmFacetNormals(pmodel);
```

```
glmVertexNormals(pmodel, 90.0);
```

```
glmDraw(pmodel, GLM_SMOOTH | GLM_MATERIAL);
```

判断物体是否被抓: gCurrentDragObj=-1

包围盒 (OBB, Oriented Bounding Box) [16]

碰撞检测, 当需要对该包围盒内的面片进行力觉/触觉渲染时只需要在主线程中调用如下函数即可:

```
hlBeginShap
```

```
(HL_SHAPE_FEEDBACK_BUFFER,  
obj.shapeID);
```

```
glCallList (obj.displayList);
```

```
hlEndShape ();
```

当包围盒的中心和装配的正确位置的距离小于一定数值时, 自动匹配到正确位置, 完成正确装配。

3 应用分析

按照硬件系统设计方案搭建系统硬件平台, 并在此之上调试各种数据手套、位置跟踪器、力反馈器和数据头盔等人机交互设备, 建立完整的虚拟装配资源库, 场景仿真资源库以及人机交互资源库, 最终整个系统在 Visual Studio 2010 编译平台下进行最后编译, 成功后进行应用:

图 7~10 分别为应用成功的虚拟装配子系统掘进机模块中的整机装配效果图、场景仿真与漫游子系统中隐藏煤壁的综采工作面效果图、虚拟手人机交互子系统中操作者对采煤机外牵引部进行虚拟手操作以及力反馈人机交互子系统中操作者对采煤机截割部 III 轴进行虚拟力反馈虚拟装配操作。

应用实例

以太重煤机有限公司产品创新改进和新产品研发为例进行分析。该公司产品主要包括采煤机、刮

板输送机、掘进机等采掘运装备。

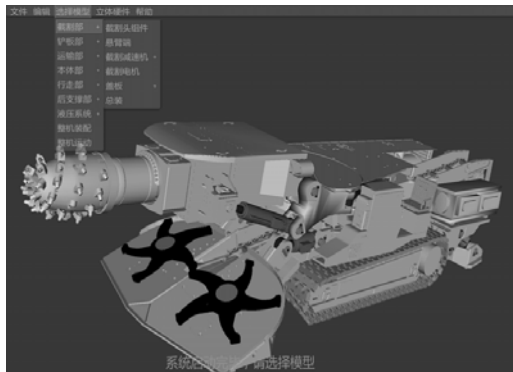


图 7 鼠标键盘装配掘进机整机

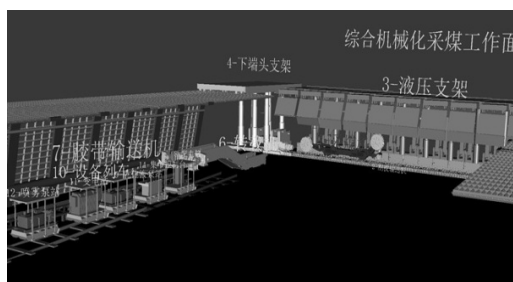


图 8 隐藏煤壁的综采工作面模型

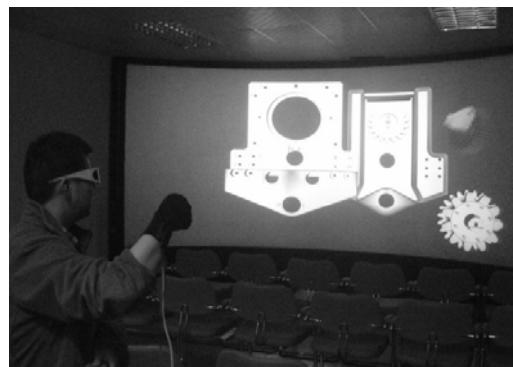


图 9 采煤机外牵引部虚拟手装配

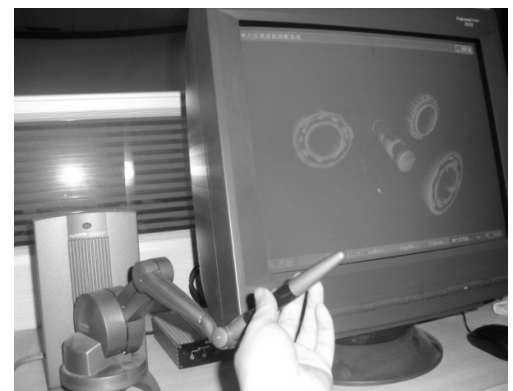


图 10 采煤机截割部III轴反馈虚拟装配

该公司设计研发人员在从旧产品到新产品进行技术革新时,必须对产品的结构、实际工作流程以及工作时起到的作用和遇到的问题有深入的研究,才可能设计出更具竞争力和针对性的新产品。而由于煤矿生产现场的复杂性、危险性和不可预知性^[17]等原因,设计人员往往无法详细研判这些因素,造成了实际设计时需要反复测算和不断更改但并未达到预期效果的不利局面,而本文研究的虚拟装配和场景仿真系统恰好弥补了这些不足,使设计者在虚拟设计仿真环境中即可充分了解和体会采掘运装备在井下实际生产中的运行工况及状态,为新产品的设计研发提供了直接而形象的现场感和全新的设计模式。

同时,设计出来的产品如果出现可装配性能差等问题,必须返回设计阶段重新设计和修改,会造成严重的资源浪费和时效延误。利用虚拟装配子系统,在设计的同时就可以检验产品的装配性能,达到设计与制造的协调和统一。而借用虚拟现实技术,在虚拟装配中加入力觉和触觉,使设计人员更能感受到实际装配环境中零部件的特征、约束等^[18],可进一步对产品进行优化和改进。

对长期以来从设计、制造再到实际工作环境中各环节相对脱离的问题,通过对本课题内容的具体运用,也得到了有效解决。

正是基于以上原因,本系统成为“煤矿综采装备山西省重点实验室”、“山西省煤机行业技术中心”、“山西省矿山机械 CAE 工程技术研究中心”和“山西省煤矿装备研究生教育创新中心”的重要的研究方向与应用课题^[19],“产学研合作成果”直接为该公司采掘运装备的设计研发提供了全新的技术手段。

4 结论

本文进行了采掘运装备虚拟装配与仿真系统的设计及关键技术的研究工作,搭建出了以

OSG+CEGUI 为主的系统框架,研究了普通模型导入虚拟现实环境的问题、运用了 3DMAX 与 OSG 相结合的动画制作方式、解决了位置跟踪器、数据手套、数据头盔和力反馈器等人机交互设备在系统中的运用问题,主要结论如下:

(1) 在传统的煤矿装备的设计研发过程中运用先进的虚拟现实技术,有着广阔的应用前景,行业领域对建立“采掘运装备虚拟装配与仿真系统”表现积极。

(2) 利用该系统进行产品研发和装配设计,可以准确、快速地了解产品的结构,缩短产品研发和装配周期,降低成本,提高效率。

(3) 利用该系统场景仿真,可以清晰地虚拟再现煤炭生产过程中设备的整体及局部运行状态,特别是在煤矿井下高危环境下的运行,具备独特的优势和特异性,对煤炭生产的安全、工况和时效都具有十分重要的现实意义。

(4) 采掘运装备虚拟装配与仿真系统的设计及关键技术已基本成熟,试运行效果比较满意,可以有效解决采掘运装备从设计、制造再到实际工作环境中各环节相对脱离的问题,具备推广价值。

(5) 采掘运装备虚拟装配与仿真系统功能完整,操作简单,具有沉浸性、交互性和构想性,可为其他机械装备建立虚拟装配与仿真系统提供借鉴和参考,并可用于技术培训和实验教学。

参考文献:

- [1] 腾讯科技. 于润沧院士: 矿业开采要走数字化矿山之路 [EB/OL]. (2008-01-08) [2014-02-25]. <http://tech.qq.com/a/20080108/000315.htm>.
- [2] Mallett L, Unger R. Virtual reality in mine training [J]. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (S1075-8623), 2007, 59(2): 1-4.
- [3] Orr T J, Mallet L G, Margolis K A. Enhanced fire escape training for mine workers using virtual reality simulation [J]. Mining Engineering (S0026-5187), 2009, 61(11): 41.
- [4] Tichon J, Burgess-Limerick R. A review of virtual reality as a medium for safety related training in mining [J]. Journal of Health & Safety Research & Practice (S1837-5030), 2011, 3(1): 33-40.
- [5] 赵国梁. 综采工作面安全生产虚拟现实系统关键技术研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- [6] 蔡治邦. 矿井安全生产虚拟现实系统的研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- [7] 代昌标. 煤矿安全虚拟现实仿真系统总体设计及关键技术的研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2007.
- [8] 李建忠. 综采工作面场景及覆岩垮落的动态虚拟 [D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [9] 禹亮. 采煤工作面仿真系统研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2008.
- [10] 刘洋. 基于 VR 技术的煤巷综掘仿真系统的研究与开发 [D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
- [11] Ritchie J M, Lim T, Medellin H, et al. A haptic based virtual assembly system for the generation of assembly process plans [C]// XV Congress International SOMIM. Sonora, Mexico: Derchos Reservados (OBREGON), 2009: 23-25.
- [12] 罗世魁, 王国强, 李欣, 等. 掘进机截割头的虚拟装配 [J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 655-658.
- [13] 姚继权, 李晓豁, 刘桂玲. 刮板输送机虚拟装配与运动仿真的研究 [J]. 矿山机械, 2010, 38(1): 4-7.
- [14] 王锐, 钱学雷. 三维渲染引擎设计与实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 56.
- [15] 崔艳波, 王彤宇. 虚拟环境下基于力反馈的钉孔装配 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(2): 100-104.
- [16] 杨庆东, 李富强. 面向复杂结构机械虚拟装配系统[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2012, 27(01): 12-15.
- [17] 荀国. 建立安全长效机制 打造本质安全型矿井 [J]. 神华科技, 2010, 8(2): 11-13.
- [18] 陈成军. 基于力觉/触觉反馈的虚拟装配系统相关技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [19] 三晋都市报. 新山西 新跨越 新成就——太重煤机: “借脑创新”裂变增长 [EB/OL]. (2012-05-17) [2014-02-26]. <http://www.sxrb.com/sjdsb/Aban112/A3/1439410.html>.