

10-18-2022

## Multi-sensory Fusion Method for Power Transformer Virtual Assembly

Xuqiang Shao

*North China Electric Power University, Baoding 071000, China;* shaoxuqiang@163.com

Haowei Zhang

*North China Electric Power University, Baoding 071000, China;*

Xiaohua Feng

*North China Electric Power University, Baoding 071000, China;* 1064522174@qq.com

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.

---

## Multi-sensory Fusion Method for Power Transformer Virtual Assembly

### Abstract

**Abstract:** Virtual assembly technology is to truly restore the equipments and physical scenarios. In the real world, people can interact with the physical world through visual, auditory, tactile and other sense organ. Aiming at the existing virtual assembly system being limited the single sense human-computer interaction mode, *so a multi-sense fusion information interaction method is proposed to improve the sense of immersion and operability. An improved AABB Octree bounding box collision detection algorithm of large size diffidence component to be assembled is proposed, which can greatly reduce the amount of calculation and improve the calculation accuracy.* The experimental result verifies the operability and the sense of immersion improvement.

### Keywords

virtual reality, virtual assembly, sensory fusion, collision detection, power transformer

### Recommended Citation

Xuqiang Shao, Haowei Zhang, Xiaohua Feng. Multi-sensory Fusion Method for Power Transformer Virtual Assembly[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(10): 2244-2254.

# 面向电力变压器虚拟装配的多感官融合交互方法

邵绪强, 张浩伟, 冯小华\*

(华北电力大学(保定), 河北 保定 071000)

**摘要:** 虚拟装配技术旨在真实还原设备和物理场景, 在真实环境中人们可以通过视觉、听觉、触觉等多种感官与物理世界进行信息交互。针对已有虚拟装配系统的真实感受限于单一感官人机交互方式的问题, 提出一种多感官融合的信息交互方法, 以提升沉浸感和操作性。提出一种在待装配体零部件体积差异性大的情况下的改进八叉树AABB包围盒碰撞检测算法, 提升计算精度的同时极大减少计算量。实验结果表明: 该方法在提高操作性和沉浸感方面有优越性。

**关键词:** 虚拟现实; 虚拟装配; 感觉交互; 碰撞检测; 电力变压器

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)10-2244-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0604

## Multi-sensory Fusion Method for Power Transformer Virtual Assembly

Shao Xuqiang, Zhang Haowei, Feng Xiaohua\*

(North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** Virtual assembly technology is to truly restore the equipments and physical scenarios. In the real world, people can interact with the physical world through visual, auditory, tactile and other sense organ. Aiming at the existing virtual assembly system being limited the single sense human-computer interaction mode, so a multi-sense fusion information interaction method is proposed to improve the sense of immersion and operability. An improved AABB Octree bounding box collision detection algorithm of large size diffidence component to be assembled is proposed, which can greatly reduce the amount of calculation and improve the calculation accuracy. The experimental result verifies the operability and the sense of immersion improvement.

**Keywords:** virtual reality; virtual assembly; sensory fusion; collision detection; power transformer

## 引言

虚拟现实人机交互技术发展迅速, 在各行各业都有所涉及和应用, 尤其是在影视、游戏、建筑、医学、工业生产制造等领域。随之派生的虚拟装配技术则在生产制造的过程中发挥着越来越重要的作用, 是虚拟现实技术在工业制造生产行业的典型应用。当前, 生产单位的零件设备安装培训大多基于实际操作, 对培训场地和培训设备

都有一定的要求, 再加上平时零部件设备的磨损开销, 使员工培训的成本大大提高。出于对这些问题的考虑, 利用计算机的虚拟仿真技术对员工进行装配培训可以大大降低在空间上的约束以及减少培训成本, 提高培训效率。

随着虚拟现实人机交互技术的发展, 立体视觉、立体听觉、触觉反馈, 以及力反馈等交互方式逐渐应用于虚拟装配领域。在已有的研究中,

收稿日期: 2021-06-29 修回日期: 2021-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(61502168); 河北省自然科学基金(F2020502014); 中央高校基本科研业务费专项(2021MS095); 北京市自然科学基金(4182018)

第一作者: 邵绪强(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为计算机图形学。E-mail: shaouxuqiang@163.com

通讯作者: 冯小华(1994-), 男, 硕士, 研究方向为虚拟现实。E-mail: 1064522174@qq.com

用户在虚拟装配系统中基本上都只是通过单一感官与虚拟环境进行信息交互, 而现实物理环境中, 在进行装配操作时人们可以通过眼、耳、口、鼻和肢体接触等多种感觉通道来感受反馈的信息, 因此感觉通道的限制会对用户的沉浸感产生很大的影响。

另外, 由于待装配的工业生产设备的零部件体积差异巨大, 而碰撞检测的基础参数是模型表面的三角面片数和顶点数, 因此导致不同体积模型的碰撞计算效率会存在差异。如果采用传统的AABB八叉树层次包围盒碰撞检测算法, 虽然计算精度满足实际需要, 但计算效率会因为受到碰撞对象体积差异的影响而降低。

针对以上问题, 本文提出了多感觉通道有机融合的人机交互方式, 包括3D视觉、立体听觉、语音识别、触觉反馈, 以及手势识别。尽可能地还原真实物理环境中人与环境的信息交互模式, 以求达到更为真实的沉浸效果。基于对象包围盒的体积差异, 提出了改进的八叉树AABB层次包围盒碰撞检测算法, 根据体积差异等级进行异步的包围盒分层计算, 从而在保证计算精度的基础上大幅提高计算效率。

## 1 相关工作

先前应用较多的虚拟现实交互方式有手势交互、触觉反馈交互、体态识别交互、语音识别交互以及力反馈识别交互等。这些交互方式应用了视觉、听觉、语音、触觉等感官通道, 与虚拟系统进行信息交换。

许多虚拟现实领域的专家学者在不断研究人机交互在虚拟现实场景中的应用, 探索新型感官交互方法。Mikel Sagardia等<sup>[1]</sup>设计研发了在大型和多对象环境中具有触觉反馈功能的双手虚拟装配设备训练平台, 其中包括手和手臂的双向六自由度触觉交互感应; Lu Y等<sup>[2]</sup>提出了一种基于虚拟现实无眼交互的新型认证方法, 用户在没有视觉参与的情况下利用球形布局设计的手部运动

来进行认证; 刘惠义等<sup>[3]</sup>提出一种新的手势识别方法, 首先对采集到的手势图像进行肤色检测等图像预处理, 然后采用BP神经网络技术对手势进行识别, 根据识别结果驱动视点的运动进行虚拟漫游; 鲁明等<sup>[4]</sup>提出了一种即插即用的姿态交互工具, 使用Kinect设备捕获用户姿态动作, 并使用动态时间规整方法对语义类姿态进行识别; Demir T等<sup>[5]</sup>研发了一种可以重复人类手臂运动的机械手臂, 通过创建人体骨骼结构来控制机械臂移动; Chang Y J等<sup>[6]</sup>开发了基于图像识别方法的手势识别系统, 用于认知障碍患者的康复辅助训练; 刘晓晖等<sup>[7]</sup>提出了一种基于中文语音指令辅助控制虚拟装配的方法, 并设计了一套自行车虚拟装配系统; Sun Q等<sup>[8]</sup>提出了一种可以应用于小型物理环境与静态或动态障碍的重定向行走技术, 通过跟踪眼球的快速运动实现重定向; Zhenxing Li等<sup>[9]</sup>开发了一种新型的基于注视的动觉界面, 利用用户的注视来重新定位设备的工作空间。除了虚拟头盔显示器外, 基于3D显示屏的UI界面交互和触摸交互也同样广泛用于虚拟现实环境中。Gugenheimer等<sup>[10]</sup>研发了一款3D显示器, 可通过触摸的方式与虚拟环境进行交互; Robert W等<sup>[11]</sup>将虚拟现实场景中的头戴式显示与空间定位、运动捕捉和惯性感知相结合, 实现了虚拟场景的立体显示。立体视觉与其他感官交互方式的结合也是一个研究热点<sup>[12-13]</sup>。邹俞等<sup>[14]</sup>针对航天员虚拟训练中的人机自然交互问题, 基于体态识别或手势识别和人体运动特性, 提出了一种多通道数据融合的虚拟驱动与交互方法; 林莹莹等<sup>[15]</sup>提出一种基于Leap Motion的虚拟现实陶艺体验系统, 使用户能够以裸手交互的方式模拟操作过程。

为尽可能还原人与环境交互的真实过程, 本文以电力变压器为虚拟装配的对象, 提出了一种多感官融合的人机交互方法, 为实验人员提供视觉、听觉、语音和触觉等多感官交互。同时将实际物理环境以视频图像的形式实时展示在虚拟环

境中，以提高装配培训教学效果。另外，从碰撞仿真和装配序列的角度，进行优化计算和统一规划，以改善系统仿真效果和运行流畅度。

## 2 虚拟实验场景搭建

本文借助3D建模工具，以Unity 3D为虚拟场景搭建引擎，以电力变压器模型为装配对象，进行装配和检修培训，以求达到节省企业对操作工培训的费用开销和提高培训效果的目的。在Unity引擎中搭建虚拟操作空间环境，通过纹理、光照以及Shader渲染等技术方法提高虚拟环境的真实感。

### 2.1 电力设备建模

通过SolidWorks、AUTO CAD、3DSMAX等三维建模工具，采用基于设备设计图纸的建模方法，依据真实的零部件大小比例建模，准确量化模型尺寸，避免粗略建模带来的误差，保证模型在尺寸上与实际模型一致，如图1所示。

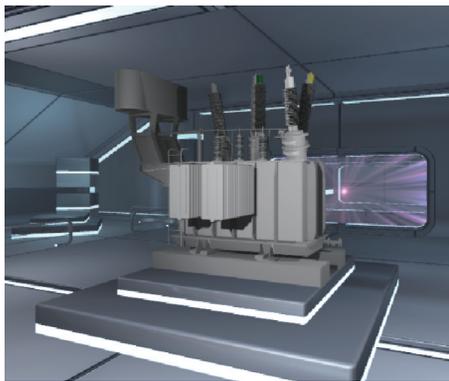


图1 虚拟实验场景  
Fig. 1 Virtual experiment scene

参照实际环境中的设备，对设备模型进行表面渲染。建模完成后以.FBX格式输出，并加载到Unity平台，在Unity平台中布置虚拟装配场景，合理设置灯光、阴影和遮挡效果，提高整个环境的真实感。同时以Microsoft Visual Studio 2017作为脚本编辑工具，整合系统程序。实验系统预留多感官输入/输出接口，并初步设计融合多种感官的交互方式。

### 2.2 零部件约束关系构建

对电力变压器设备的零部件组成约束关系进行整体分析，按位置约束、空间约束，以及层级关系进行虚拟装配序列规划。本文旨在融合多感官交互方式，对变压器设备采用多方位、多轨道的装配顺序进行分析，并将该装配顺序作为虚拟装配系统的辅助功能模块，为操作人员提供实时的装配提示。

变压器主要组成部分有：油枕、器身、电流互感器、避雷器、油温表、油位计、冷却器等。根据电力变压器的功能模块以及各组成原件间的层次关系和约束关系，对零部件进行统一归纳，分析得出装配串行顺序和可并行分组情况，对变压器进行功能模块划分，并根据各功能模块中零部件的约束关系对其装配顺序进行串并行规划，如图2所示，再将其作为虚拟装配培训的提示参照，实验人员可通过虚拟穿戴设备的手部触觉反馈自主调用。具体虚拟穿戴设备选用Oculus设备，其手柄的触摸、按压、空间定位等作为上述功能的交互方式。

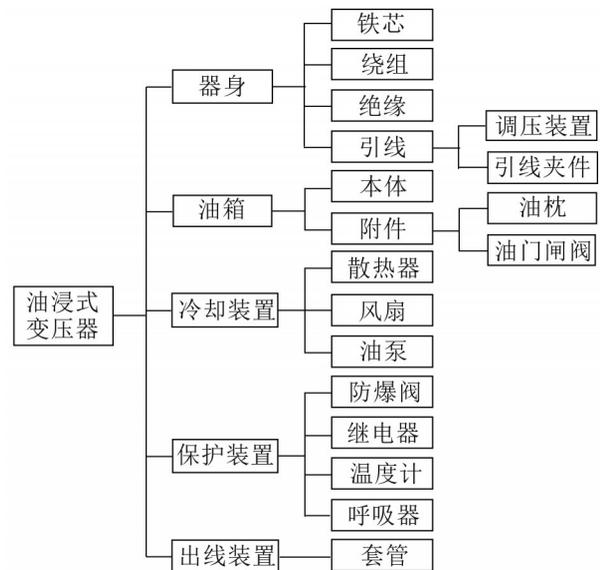


图2 串并行零部件装配规划  
Fig. 2 Serial and parallel assembly sequence planning of parts

### 3 多感官交互方法

本文系统同时融合视觉、听觉、语音、手势和触觉多种感官交互方法, 尽可能还原人与真实物理环境的交互体验。借助虚拟穿戴设备的空间定位、图像信息采集、音频信息采集和信息传输接口等功能将系统多感官交互方法有机融合, 提升实验人员操作感和沉浸感。

#### 3.1 视觉交互

本文系统的视觉交互主要采用PC显示器和虚拟头盔显示器完成, 虚拟头盔显示器通过USB接口和HDMI接口与PC电脑连接。由于采用3D虚拟头盔作为视觉交互设备, 而教导人员在教学过程中无法观察学员动态学习情况, 所以采用将外部场景以视频图像的形式实时展现在虚拟装配场景中。

通过图像采集设备实时采集外界环境信息, 利用WebCamTexture接口传入虚拟环境, 将外部环境图像数据作为“纹理”在虚拟场景中展现, 如图3所示。指导教师在操作教学过程中可以在虚拟场景中实时观察学员动向, 时刻把握讲解要点, 从而提升虚拟装配讲解教学质量。



图3 外部场景图像在虚拟装配场景中的实时展示  
Fig. 3 Real-time display of external scene image in virtual assembly scene

#### 3.2 语音识别交互

通过虚拟穿戴设备空间定位方法计算虚拟视角, 以及声源在虚拟环境中的位置参数计算左/右通道声音分贝, 实现立效果。同时, 本文系统提

供语音输入交互、综合立体听觉和语音输入, 提高可操作性和沉浸感。

由于电力变压器零部件数量众多且体积差异巨大, 零部件体积越小, 其安装精度要求就越高, 如果通过虚拟穿戴设备采用虚拟手部模拟的方式进行小部件的拾取, 无法避免地会造成误“拾取”。而采用语音指令作为辅助选取小部件对象的方式既可以提升装配/拆卸效率, 又不影响教学培训实操效果。语音识别交互选用BaiduAPI接口, 进行音频采集和语音分析, 建立零部件关键字数据库, 并设置零件对象标识, 在数据库中储存零部件标识、关键字、装配坐标, 以及角度坐标等信息, 具体实现方法如下:

(1) 通过虚拟穿戴设备的麦克风采集音频信息, 以AudioClip数据格式保存, 转换成PCM16bit数据格式, 并解析成文字信息。

(2) 调用零部件信息数据库, 将解析得到的语音文字信息作为查询条件, 在数据库中查询与之匹配的关键字, 进而调用相应对象的坐标数据。

(3) 根据查询得到的对象标识, 通过C#脚本语言识别与该对象标识相对应的Object对象。

(4) 重复上述步骤, 根据“装配”命令语音信息进行装配, 即通过零部件对象位置坐标和旋转坐标信息, 将对象移动至目标位置。

#### 3.3 手势交互

本文系统提供2种手势交互方式。①基于虚拟穿戴设备的手部姿势识别; ②基于图像识别的手势交互。

考虑Oculus和HTC两种虚拟穿戴设备, Oculus Rift CV1设备具有空间定位精度高、灵活轻便以及对物理环境要求低等优点, 故选用Oculus Rift CV1为主要交互设备。Oculus所提供的虚拟手柄, 可通过手指对手柄的接触、轻按、重按等状态识别任意手指的弯曲度, 从而实现通过手势对虚拟对象进行“抓取”“移动”“放置”等操作。

具体实现方法如下:

(1) 设置手柄状态参数, 将接触、按压、弹起等状态数字化, 便于脚本调用。

(2) 识别手部姿态, 通过空间定位算法确定手部空间位置, 经虚实坐标转换计算虚拟手部仿真对象在虚拟场景中的世界坐标。

(3) 采用射线碰撞检测的方法, 判断仿真手部与零部件对象是否发生接触。

(4) 在发生接触且手部处于抓取的状态时, 虚拟系统表现为“拾取”零部件 Object 对象成功, 计算零件对象相对于仿真手部的相对局部坐标, 并保持相对坐标不变, 从而实现零部件 Object 对象跟随仿真手部移动, 坐标变换计算公式为

$$(x_2, y_2, z_2) = (x_1, y_1, z_1) \mathbf{R}(\theta) + \mathbf{T} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{T}$  为平移矩阵;  $\mathbf{R}(\theta)$  为旋转矩阵。“拾取”过程中, 目标零部件模型相对于虚拟手模型的局部坐标保持不变。当虚拟手模型发生位移和旋转变化时, 根据局部坐标和虚拟手模型的世界坐标计算零部件模型的世界坐标, 从而实现零部件模型跟随虚拟手模型平移和旋转。

通过图像采集设备实时采集真实环境的灰度信息、深度信息和 RGB 信息, 并通过图像识别算法识别手部区域, 精确识别手指关节状态, 从而实现基于图像识别的无接触手势交互方法。本系统采用 Leap Motion 作为手部图像采集和图像识别手势分析设备。

预设手部关节不同状态下的参数化表示, 将手指从伸直状态到弯曲状态, 线性转换为 0-1 的数值。同时, Leap Motion 提供  $4 \text{ ft}^3$  的手部感应空间, 即可在此空间范围内识别手部手势和空间位置, 经虚实坐标转换, 计算手部在虚拟场景中的世界坐标值。

### 3.4 触觉反馈

本文系统的触觉反馈主要利用虚拟现实穿戴设备的震动反馈实现, Oculus 手柄内置震动电机。触觉反馈主要作用于零部件模型对象发生碰撞时,

以震动的方式反馈给实验者, 由于电力变压器设备体积较大, 零部件模型体积差异明显, 当“抓取”状态下的零件模型与虚拟场景或其他零件模型发生碰撞时, 由于视线遮挡, 实验人员不能迅速发现。所以采用基于手部震动的触觉反馈交互, 模拟物体发生碰撞时产生的震动效应。另外, 通过 C# 脚本控制, 进一步模拟碰撞发生过程, 当碰撞发生时通过改变模型对象的 RigidBody() 属性, 使对象变为不可选中状态, 从而从虚拟手中“掉落”。通过运动状态仿真模拟, 模拟零件掉落时的“下落”、“回弹”等运动状态。由于虚拟装配场景中对象的移动实质上是对象在每一帧上的世界坐标变化, 所以不能以包围盒接触作为碰撞检测条件, 应以在检测到发生干涉时的关键帧作为碰撞的发生时刻。

### 3.5 碰撞优化计算方法

由于电力设备零部件模型体积差异巨大, 如变压器的油枕部件比阀门部件的模型对象体积大几十倍, 在这种情况下如果采用经典 AABB Octree 算法对模型进行同步的八叉树层次包围盒划分, 虽然能提高碰撞精度但会浪费计算资源。故将零部件模型包围盒的体积差异作为是否进行八叉树层次划分的判断条件, 继而提出异步八叉树 AABB 包围盒碰撞检测算法。

首先对变压器所有零部件模型建立初始边界 AABB 包围盒, 在每一帧动画中对发生位移或旋转的对象重建边界包围盒, 然后根据实际情况预设碰撞计算精度阈值, 如本文系统将精度阈值设置为 5 mm, 即发生碰撞的 2 个对象的子包围盒最小边长要同时小于 5 mm, 将零部件包围盒的体积分为 10 个等级, 并设置与体积等级相对应的计算标识, 如将包围盒体积在  $10 \text{ mm}^3$  以内设置为一级标识, 体积在  $10 \sim 20 \text{ mm}^3$  设置为二级标识, 以此类推。

在经典 AABB Octree 算法的碰撞过程中, 当第 1 层包围盒发生碰撞时, 2 个碰撞对象同时进行八叉树分层, 如图 4(a) 所示, 将原始包围盒分别

等分成8个相同体积的子包围盒, 并判断子包围盒的最小边长是否达到精度阈值, 若没有达到则同时对2个对象碰撞发生区域的第2层子包围盒进行等体积的八叉树分层, 如图4(b)所示; 以此循环计算, 直至子包围盒最小边长达到预设精度。

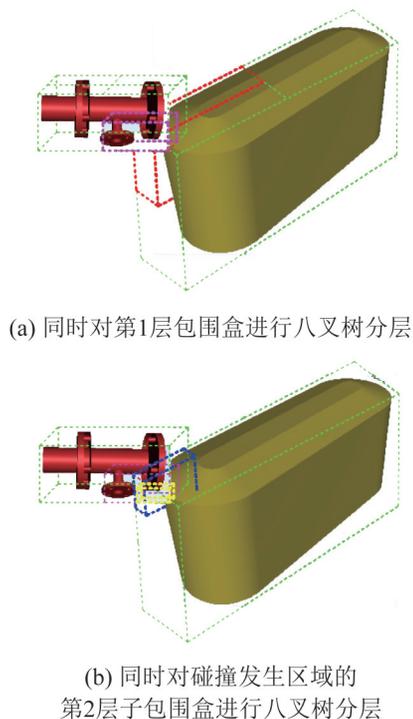


图4 经典八叉树AABB层次包围盒算法

Fig. 4 Classical octree AABB hierarchical bounding box algorithm

而本文基于体积的优化AABB Octree算法, 在第1层包围盒发生碰撞时, 首先判断2个对象包围盒的体积差异, 如图5(a)所示。若位于不同的体积等级, 仅对大体积对象的包围盒进行八叉树分层, 并将其子包围盒作为下一级碰撞计算的体积包围盒, 较小体积等级的包围盒不进行分层, 如图5(b)所示。若位于相同的体积等级, 则对2个对象的包围盒同时进行八叉树分层。然后继续判断2个对象子包围盒的体积差异, 若位于不同体积等级仍然仅对大体积对象的包围盒分层; 若位于相同体积等级则对2个包围盒同时分层, 如图5(c)所示。以此循环计算, 直至2个对象子包围盒的最小边长同时达到预设精度。显然, 基于体积的

优化AABB Octree算法节省了一次小体积对象的八叉树分层计算过程, 从而在保证计算精度的同时提升了计算速度。

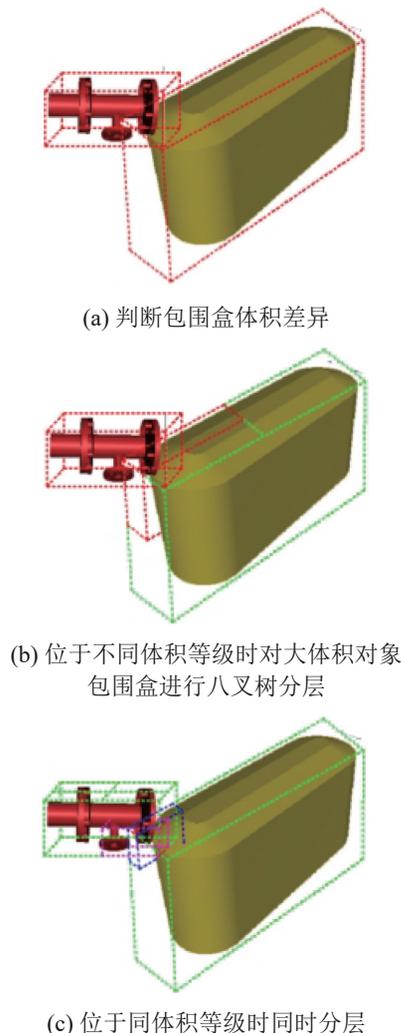


图5 考虑体积差异的优化八叉树AABB层次包围盒算法

Fig. 5 Optimized octree AABB hierarchical bounding box algorithm

## 4 实验

### 4.1 多感觉通道实验

本实验在PC电脑端进行, 操作环境配置: 操作系统为Windows 10; 处理器为Intel i5-9400 2.9 GHz; 显卡为NVIDIA GeForce GTX1060 6 G; 内存为8 G。采用Unity 3D 2018.3.7f1为物理引擎, 虚拟现实设备采用Leap Motion和Oculus Rift CV1。Leap Motion通过USB 3.0数据接口与PC电

脑连接。PC电脑通过2个USB 3.0接口与Oculus定位器连接，通过1个USB 3.0接口和1个HDMI接口与Oculus头盔相连接。

#### 4.1.1 实验过程

用于教学培训的虚拟装配系统的对比实验可在学员装配操作时间和沉浸感体验两方面进行实验结果分析。分别设置仅支持Leap Motion交互的虚拟装配系统和仅支持Oculus Rift交互的虚拟装配系统作为对照组，每组系统均包含外部场景实时视频接入模块。本实验招募了30个志愿者(男性:18人;女性:12人)，年龄在22~40周岁之间，所有志愿者从未接触过电力变压器设备任何形式的学习也没有虚拟现实技术的理论基础。首先对所有志愿者进行统一的设备讲解，然后将志愿者分为3组，每组10人，保证每组的年龄和性别差异最小。

对第1组志愿者进行1h的基于Leap Motion手势交互的虚拟装配系统操作培训，如图6所示。对第2组志愿者进行1h的基于Oculus Rift CV1的操作培训，如图7所示。对第3组志愿者进行1h的本文多通道自然交互的操作培训。培训完成，由志愿者进行装配体验，并记录装配完成时间。

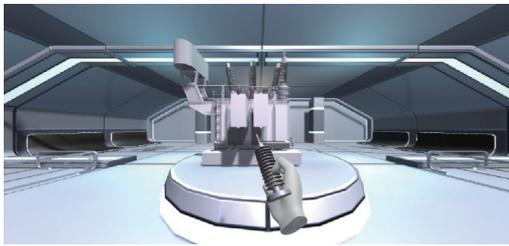


图6 Leap motion对照组实验  
Fig. 6 Control experiment of leap motion

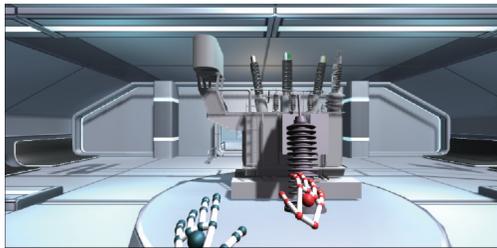


图7 Oculus Rift对照组实验  
Fig. 7 Control experiment of oculus rift

#### 4.1.2 实验结果分析

3组志愿者完成虚拟装配操作所用的时间对比曲线如图8所示。

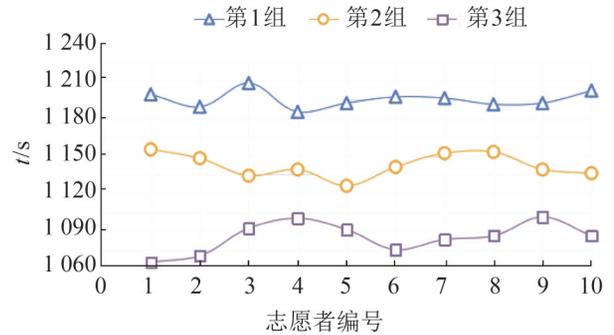


图8 志愿者完成虚拟装配操作所用时间对比  
Fig. 8 Time comparison curve for volunteers to complete virtual assembly operation

由图8可知，第3组志愿者完成虚拟装配操作的总时长最短，第1组志愿者完成时间最长，第2组志愿者完成总时间居中。实验结果表明采用多种交互方式的虚拟装配系统教学效率最高，且操作灵活方便，更易于学员学习。

对3组志愿者进行另外2个虚拟装配系统的操作培训。对第1组志愿者进行基于Oculus Rift CV1的虚拟装配系统和本文多感觉通道自然交互虚拟装配系统的操作培训。培训完成后，每位实验者分别在另外2个虚拟装配系统中完成虚拟装配操作。实验完成后，对每位志愿者进行系统沉浸感问卷调查，选出沉浸感最强的实验组，问卷调查统计结果如图9所示。

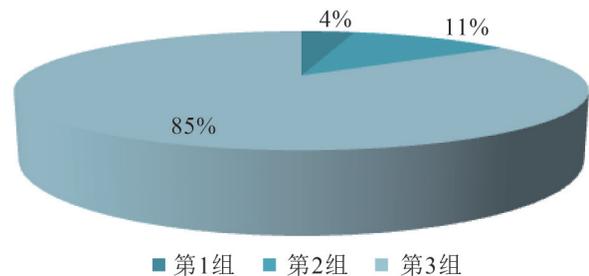


图9 虚拟装配系统沉浸感评价结果  
Fig. 9 Evaluation results of immersion of virtual assembly system

对 3 组实验的沉浸感问卷调查结果进行分析对比, 由图 9 可知, 85% 的志愿者认为多感觉通道自然交互虚拟装配系统沉浸感最强。实验表明: 多感觉通道自然交互的虚拟装配系统相比于传统单一交互方式的虚拟装配系统提高了教学效率, 同时也提升了系统沉浸感。

### 4.2 单一感觉通道与多感觉通道对比实验

本实验部分所需的环境配置以及软硬件条件与 4.1 实验部分完全相同。

#### 4.2.1 实验过程

本实验通过对电力变压器的油枕、低压套管, 以及放油阀门这 3 种不同体积大小的零部件的装配来进行基于 Leap Motion 的手势交互、基于 Oculus 的手势交互、语音识别交互与本文的多感觉通道交互的性能对比, 并且对每种单一交互方式成功拾取物体这一特定动作的响应效率进行对比分析。实验场景如图 10 所示。

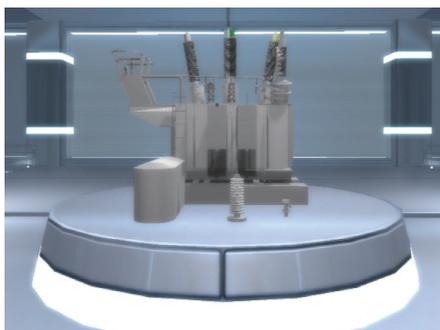


图 10 单一通道交互与多通道交互对比实验场景  
Fig. 10 Experimental scene of single-channel interaction and multi-channel interaction comparison

在 30 名志愿者中挑选 28 名平均分成 4 组, 每组 7 人, 由于在 4.1 实验部分已经对所有志愿者进行了必要的操作培训, 这里无需再进行额外培训。分别对前 3 组志愿者利用基于 Leap Motion 手势交互、基于 Oculus 手势交互、语音识别交互的方式完成对油枕、低压套管和放油阀门 3 个零部件的装配, 并分别记录志愿者对每个零部件成功进行拾取所用时间以及完成装配任务所花费的总时间。

对第 4 组志愿者利用本文的多感觉通道交互的方式完成对油枕、低压套管和放油阀门 3 个零部件的装配, 记录志愿者完成装配任务所花费的总时间。

#### 4.2.2 实验结果分析

前 3 组志愿者对油枕部件、低压套管部件, 以及放油阀门部件进行成功拾取所用时间的对比曲线分别如图 11~13 所示。所有的 4 组志愿者完成装配任务所花费总时间对比曲线如图 14 所示。

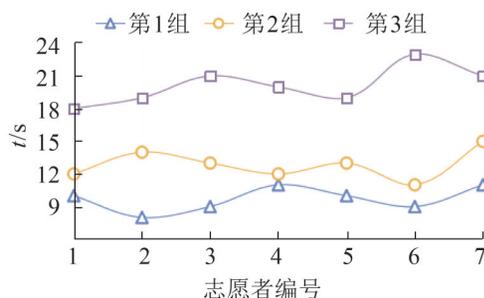


图 11 前 3 组志愿者拾取油枕所用时间对比  
Fig. 11 Time comparison curve for first three groups of volunteers to pick up the oil conservator



图 12 前 3 组志愿者拾取低压套管所用时间对比  
Fig. 12 Time comparison curve for first three groups of volunteers to pick up the low voltage bushing

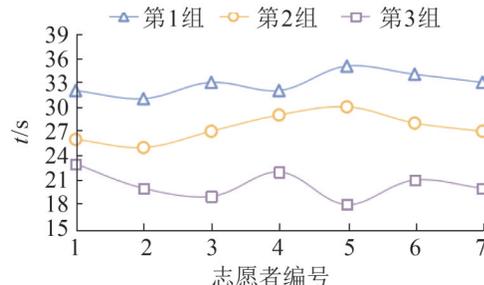


图 13 前 3 组志愿者拾取放油阀门所用时间对比  
Fig. 13 Time comparison curve for first three groups of volunteers to pick up the oil drain valve

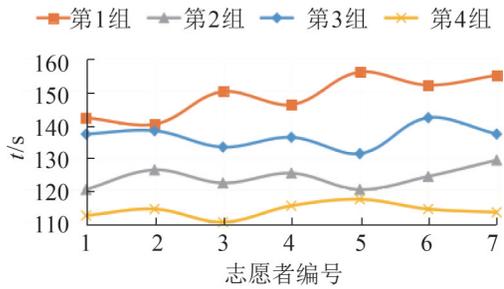


图14 志愿者完成装配任务所用总时间对比曲线

Fig. 14 Total time comparison curve for volunteers to complete assembly tasks

由图11~13可知,基于Leap Motion的手势交互方法对于拾取例如电力变压器油枕这种体积较大的零部件效果较好,拾取效率优于Oculus手势交互和语音识别交互方法,但对于拾取例如放油阀门这种小体积的零部件所花费的时间较长;基于Oculus的手势交互方法对于拾取大体积的零部件也具有较好效果,而且对于拾取例如低压套管这种中等体积零部件的效率优于Leap Motion手势交互和语音识别交互方法;基于语音识别的交互方法对于拾取不同体积的零部件效率基本相同,但在拾取小体积零部件的效率上会优于手势识别交互方式,而对于中大型体积零部件的拾取效率不如手势识别交互。

由图14可知,第4组志愿者完成装配任务的总时长最短;第1组志愿者完成装配任务的时间最长;第2组第3组志愿者完成总时间居中,并且第2组的总时长少于第3组。此实验结果表明采用多种交互方式进行虚拟装配的效率会高于只采用某一种单一交互的方式,具有最佳的装配效果;此外基于Oculus的手势交互和语音识别交互的方法也表现出较好的装配效果,而基于Leap Motion手势交互方法的整体效果不够理想。

### 4.3 碰撞检测实验

本文改进AABB Octree碰撞检测算法实验采用如图4所示的变压器阀门和油枕零件模型作为实验对象。阀门和油枕零件模型参数如表1所示,

开发引擎采用unity 3D,脚本编辑采用Visual Studio 2017。

表1 阀门和油枕模型详细参数

Table 1 Detailed parameters for valve and oil conservator models

零件	体积参数/(mm)			顶点数	三角面片数
阀门	48	24	24	14 830	13 886
油枕	72	105	233	1 988	1 950

#### 4.3.1 实验过程

本实验设置A、B两组经典AABB Octree算法作为对照组,实验组为基于体积差异的AABB Octree算法。碰撞检测子包围盒精度阈值设为5 mm。分别记录实验组和对照组的碰撞检测运算时间,进行效率对比。

实验组在进行实验过程中,当第1层包围盒发生碰撞时,首先判断两个对象包围盒的体积是否位于同一等级,如果是,则同时对2个对象的包围盒进行八叉树分层,如果不是,则仅对大体积对象的包围盒进行八叉树分层,直至达到精度阈值。

A对照组在实验过程中当第1层包围盒发生碰撞时,不考虑体积差异,对两个对象的包围盒同时进行八叉树分层,直至体积较小对象的子包围盒最小边长达到精度阈值。B对照组在实验过程中计算过程与A对照组相同,但碰撞计算直至大体积对象的子包围盒最小边长达到精度阈值。

#### 4.3.2 实验结果分析

分别记录实验组和对照组算法运算时间和包围盒分层数,具体实验数据如表2所示。

表2 实验组和对照组结果对比

Table 2 Results of experimental group and control group were compared

组别	包围盒分层数		运算时间/ms
	阀门	油枕	
实验组	3	4	6.083 2
对照组A	3	3	6.012 6
对照组B	4	4	6.127 8

对比实验结果, 实验组的计算时间比对照组 A 略长, 但实验组油枕对象的分层深度比对照组 A 多一层, 所以其精度比对照组 A 高。而对照组 B 的运算时间最长, 阀门对象的包围盒分层深度也要更深一层, 但油枕对象体积比阀门对象体积大 60 余倍, 导致整体计算精度仍然与实验组相同。

综上所述, 在设备零部件体积差异较大的虚拟装配系统中, 基于对象体积差异的改进 AABB Octree 碰撞检测算法, 在保证计算精度的同时提高了计算效率。

## 5 结论

本文以电力变压器为虚拟装配对象, 提出一种多感官融合的交互方法, 并对变压器零部件构成进行统一分析和多方位装配序列规划。针对变压器设备零部件体积差异性特点, 通过设置碰撞精度阈值和划分体积等级的方式, 基于体积因素改进了八叉树 AABB 层次包围盒算法, 提高碰撞检测精度的同时大大减少了计算量。结合视觉、语音、手势识别等信息交互方式, 极大地还原了人与自然交互的感官方式, 使虚拟装配过程更加灵活易操作。通过对比实验, 证明多感觉自然通道的交互方式可以大大提高虚拟装配教学的效率以及参与者的沉浸感, 改进的 AABB Octree 碰撞检测方法具有更高的计算效率, 可以进一步提升教学培训效果。

## 参考文献:

- [1] Sagardia M, Hulin T, Hertkorn K, et al. A Platform for Bimanual Virtual Assembly Training with Haptic Feedback in Large Multi-Object Environments[C]//22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology. New York: ACM, 2016: 153-162.
- [2] Lu Y, Gao B Y, Long J, et al. Hand Motion with Eyes-Free Interaction for Authentication in Virtual Reality[C]//2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops. Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 714-715.
- [3] 刘惠义, 王治. 一种基于手势的虚拟场景交互方法[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(12): 2671-2675.
- [4] Liu Huiyi, Wang Zhi. Method on Hand Gesture-Based in Virtual Scene[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(12): 2671-2675.
- [5] 鲁明, 王真水, 田元, 等. 一种基于 Kinect 的虚拟现实姿态交互工具[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(9): 2124-2130.
- [6] Lu Ming, Wang Zhenshui, Tian Yuan, et al. Posture Interaction Tool for Virtual Reality Based on Kinect[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(9): 2124-2130.
- [7] Demir T, Mutlu U, Yıldırım T. Motion-Controlled Virtual Reality Robotic Arm with Kinect[C]//2018 Innovations in Intelligent Systems and Applications. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1-5.
- [8] Chang Y J, Chen S F, Chuang A F. A Gesture Recognition System to Transition Autonomously Through Vocational Tasks for Individuals with Cognitive Impairments[J]. Research in Developmental Disabilities (S0891-4222), 2011, 32(6): 2064-2068.
- [9] 刘晓晖, 万丽莉, 季红, 等. 基于中文语音交互的虚拟装配技术研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(9): 2056-2061.
- [10] Liu Xiaohui, Wan Lili, Ji Hong, et al. Research on Virtual Assembly Technique Based on Chinese Voice Interaction[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(9): 2056-2061.
- [11] Sun Q, Patney A, Wei L Y, et al. Towards Virtual Reality Infinite Walking: Dynamic Saccadic Redirection[J]. ACM Transactions on Graphics(S0730-0301), 2018, 37(4): 1-13.
- [12] Li Z, Akkil D, Raisamo R. Gaze-Based Kinaesthetic Interaction for Virtual Reality[J]. Interacting with Computers(S0953-5438), 2020, 32(1): 17-32.
- [13] Gugenheimer J, Dobbstein D, Winkler C, et al. Facetouch: Enabling Touch Interaction in Display Fixed Uis for Mobile Virtual Reality[C]//The 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology. New York, NY: ACM, 2016: 49-60.
- [14] Lindeman R W, Sibert J L, Hahn J K. Towards Usable VR: An Empirical Study of User Interfaces for Immersive Virtual Environments[C]//SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY: ACM, 1999: 64-71.
- [15] Gunkel S, Prins M, Stokking H, et al. WebVR Meets WebRTC: Towards 360-Degree Social VR Experiences [C]//2017 IEEE Virtual Reality. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2017: 457-458.
- [16] Zielinski D, Macdonald B, Kopper R. Comparative Study of Input Devices for a VR Mine Simulation [C]//2014 IEEE Virtual Reality. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2014: 125-126.

- [14] 邹俞, 晁建刚, 杨进. 航天员虚拟交互操作训练多体感融合驱动方法研究[J]. 图学学报, 2018, 39(4): 742-751.  
Zou Yu, Chao Jiangang, Yang Jin. On Multi-Somatosensory Driven Method for Virtual Interactive Operation Training of Astronaut[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(4): 742-751.
- [15] 林莹莹, 蔡睿凡, 朱雨真, 等. 基于Leap Motion的虚拟现实陶艺体验系统[J]. 图学学报, 2020, 41(1): 57-65.  
Lin Yingying, Cai Ruifan, Zhu Yuzhen, et al. Virtual Reality Pottery Modeling System Based on Leap Motion [J]. Journal of Graphics, 2020, 41(1): 57-65.