

基于虚拟现实技术的超声波检测仿真系统设计

吴挺辉 侯怀书 刘彩霞

上海应用技术大学机械工程学院 上海 201418

摘要: 本研究针对超声检测实验中存在的成本高、效率低和交互性差的问题,设计并实现了一款超声波检测虚拟仿真系统。运用Unity3D平台实现物理实体和虚拟系统的双向映射,结合SolidWorks与3ds Max构建三维模型,采用C#语言编写核心脚本,实现系统UI界面设计方案,并设计实时优化分层八叉树包围盒碰撞检测算法,通过30名不同背景的人员测试,结果表明该系统功能齐全、画面流畅、易于上手且交互性强,在超声波检测实验仿真领域具有广阔的应用前景。

关键词: Unity3D; 超声波检测; 三维模型; 碰撞检测算法

引言: 超声波检测作为一种关键的无损检测技术,广泛应用于众多领域^[1]。然而,传统的实验方式受限于高额的实物样本和复杂设备投入。近年来,虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术的快速发展为超声波检测实验提供了一种新的思路^[2]。

本文旨在设计并实现一款基于Unity3D平台的超声波检测仿真系统,以精细化模拟检测过程为核心,旨在降低成本、提升学习效能、减轻设备损耗并增强交互体验,有望为推动超声波检测仿真技术的创新应用提供有力支撑。

1 可视化模型构建

实现三维可视化的关键在于参照实际尺寸规格,运用建模工具构建三维实体模型^[3]。超声检测的建模流程细分为三个阶段:设计规划、模型制作和后期优化。

在设计规划阶段,关键任务在于整理超声检测设备建模所需的数据资料,通过深入剖析其结构特性和运行机制,进而转化为可视化模型的需求分析和实施方案。其次,模型制作阶段着重强调精度,对超声检测系统模型设定严谨的尺寸、贴图 and 渲染标准,通过运用SolidWorks和3ds Max软件,精准构建并优化模型,确保模型结构尺寸严格契合实际超声检测设备的要求,具体设备模型见图1所示。



图1 设备模型图

后期优化阶段聚焦于运用Unity3D的纹理贴图技术和光照处理功能。纹理贴图原理是将二维纹理映射至三维模型表面,模拟物体表面细微特征,从而增强模型的真实感;而光照处理则是通过调节光源颜色、强度、散射等多种参数,借助渲染路径优化光线质量和表现效果,确保最终仿真结果兼具高性能与高质量。

2 人机交互界面设计

在超声波检测仿真系统中,UI界面设计是构建用户交互的核心环节^[4]。本系统采用UGUI组件构建界面,其基础控件以Canvas(画布)为根本容器,涵盖了视觉呈现与交互操作两大部分,有效地展示了实验步骤、材质参数以及缺陷影像等多元信息的动态视图化效果。

人机交互设计对于提升用户体验与操作效能至为关键。用户须在虚拟场景中模拟操控超声探头以确保精确数据采集, Camera(摄像机)扮演了基础交互功能的角色,其属性通过捕获交互设备状态实时调节,利用Event System(事件管理系统)架构实现交互^[5],当用户通过鼠标动作或射线投射在虚拟世界内选择和操作对象时,系统自动生成穿越三维空间的射线,此射线能与虚拟实体执行碰撞检测,如图2所示。系统会逐帧更新射线与物体间的碰撞信息,并对比连续帧数据以触发相关事件,驱动场景中视觉场景的变化^[6]。通过对碰撞事件设定预定义响应及其回调机制,增强了用户对操作的直观感知及系统反馈的即时性,有力提升了沉浸式体验和操

第一作者简介: 吴挺辉(1997.9-),男,汉族,浙江金华人,硕士;研究方向:数字化仿真技术。

通讯作者/第二作者简介: 侯怀书(1972-),男,汉族,山东潍坊人,博士,教授;研究方向:无损检测与机电一体化集成技术。通讯邮箱: hhs@sit.edu.cn。

第三作者简介: 刘彩霞(1978-),女,汉族,山东潍坊人,硕士,讲师;研究方向:过程设备的自动控制与无损检测。

作满意度。

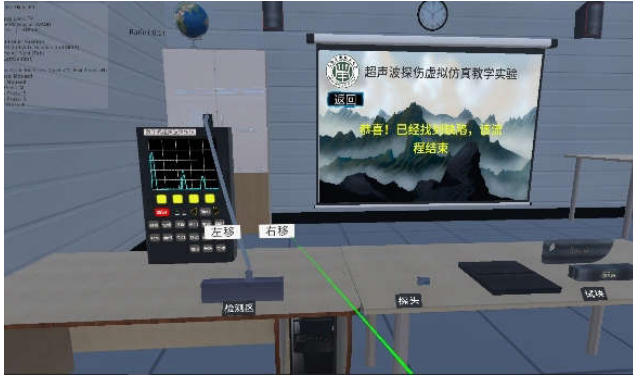


图2 人机交互界面

3 碰撞检测算法优化

碰撞检测是人机交互的核心环节之一，用于判断虚拟三维空间中物体是否相交。传统的基于八叉树OBB (Oriented Bounding Box) 包围盒碰撞检测尽管在碰撞的识别方面具有优势，但响应速度较慢，会导致物体位置判断延迟产生误差。

故本文提出了一种实时优化分层八叉树包围盒碰撞检测算法，将包围盒和树形结构进行结合，利用顶点坐标的一阶和二阶统计特性确定OBB的位置和方向，计算包围盒顶点的分布均值 $\mu^{[7]}$ ，计算公式如下：

$$\mu = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n (Q_i + P_i + R_i) \quad (1)$$

其中 n 代表三角面片数量， Q_i 、 P_i 和 R_i 分别为第 i 个三角形顶点的向量，由顶点的均值计算协方差矩阵 C_{jk} ：

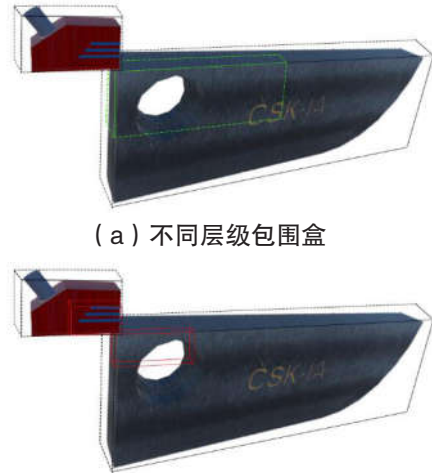
$$C_{jk} = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n (\bar{P}_j^i \bar{P}_k^i + \bar{Q}_j^i \bar{Q}_k^i + \bar{R}_j^i \bar{R}_k^i), 1 \leq j, k \leq 3 \quad (2)$$

其中 $\bar{P}^i = P_i - \mu$ ， $\bar{Q}^i = Q_i - \mu$ ， $\bar{R}^i = R_i - \mu$ 均相对于均值 μ 的位移向量，协方差矩阵 C_{jk} 为对称矩阵，据此计算包围盒尺寸，以试块CSA-1A和某种规格的斜探头为例，表1为两个物体的OBB包围盒模型参数，设定包围盒阈值为5mm。

表1 OBB包围盒模型详细参数

零件模型	长/ (mm)	宽/ (mm)	高/ (mm)
CSA-1A	300	23	100
斜探头	34	19	23

本优化算法原理如图3 (a) 所示，当第一次碰撞两个包围盒处于不同层级时，初次碰撞若两者位于不同层级，则仅对较高级别的CSA-1A包围盒进行八叉树细分，低层级的斜探头包围盒则保持原状。如图3 (b) 所示，再次碰撞二者处于同一层级时，双方包围盒同步细分，直到两个物体的包围盒层级均达到系统设定的最小阈值，碰撞检测流程终止。



(a) 不同层级包围盒

(b) 相同层级包围盒

图3 包围盒层级划分

碰撞检测数据如表2所示。结果显示，相较于传统的基于八叉树OBB算法只需3次碰撞即可达到预设精度阈值，虽然实时优化分层八叉树OBB算法因增加一次区域分层而导致单次碰撞运算时间稍长，但由于其平均层级碰撞所需时间缩短，通过优化碰撞检测流程减少了无效操作时间，整体效率提升了约15%，从而满足了超声检测系统对快速精准识别的需求。

表2 碰撞检测数据对比

	区域层次数	碰撞运算时间/ms	平均层次数碰撞运算时间/ms
传统的基于八叉树OBB算法	3	5.78	1.93
实时优化分层八叉树OBB算法	4	6.68	1.67

4 系统功能测试

系统功能测试是确保仿真系统能够满足用户真实需求的关键环节之一。为了检验该系统能否满足性能测试实验的标准，征集了30位不同背景的测试参与者，根据参与者的经验和背景划分为两个实验组：一组通过HTC VIVE虚拟现实头盔和手柄操控；另一组则采用传统的鼠

标键盘进行实验操作，以此保障测试结果的多元性和普适性，设定的测试评价指标包括：系统功能完备性、画面流畅性、操作易学性和交互性^[8]。经过这30名测试者检验，系统展现出了全面的功能性能，成功地模拟了所有实验流程，具体的用户满意度实验如表3所示。通过对实验数据进行统计分析，结果显示优秀率达到87.5%。

表3 用户满意度实验

测试指标	良好	一般	差
系统功能的完备性	26	4	0
系统画面的流畅度	27	3	0
系统操作的易学性	24	5	1
系统操作的交互度	28	2	0

5 结论

本研究设计并实现了一款基于Unity3D的超声波检测仿真系统，通过三维建模软件构建逼真模型与实验场景，利用实时优化分层八叉树OBB算法优化模型碰撞检测性能。有效降低了成本、提高了学习效率与交互性。实验证明，该系统不仅能满足超声无损检测的教学与培训需求，还能通过虚拟仿真技术为用户提供更直观、便捷、安全的实验环境。

参考文献

[1]孙国锋,丁金华.一种数字孪生背景下的组合秤仿真技术[J].电子测量技术,2021,44(12):144-146.

[2]吴博.虚拟现实技术在高校图书馆信息服务中的应用[J].电子技术与软件工程,2020(17):134-135.

[3]张文,周金宇,任维彬,等.基于Unity3D的激光熔覆虚拟试验平台开发[J].机械设计与制造,2022(4):220-225.

[4]刘文倩,韩利峰,黄丽,等.实时在线监控系统的三维可视化方案[J].计算机应用,2022,42(S1):268-270.

[5]惠记庄,樊博涵,丁凯,等.基于虚拟现实的钢结构桥梁装配化施工仿真系统[J].建筑科学与工程学报,2022,39(4):108-116.

[6]冯磊华,侯孟超,王欣然,等.双进双出钢球磨煤机料位控制虚拟仿真研究[J].制造业自动化,2022,44(12):135-137.

[7]蔡宝,朱文华,史秋雨,等.虚实融合的工业机器人实验平台研究[J].机床与液压,2021,49(23):54-60.

[8]文国军,夏雨,基于Unity3D的水平定向钻机虚拟实训系统设计[J].系统仿真学报,2020,32(5):801-803.