

减速器虚实交互 AR 装配系统设计研究

柳丽 王晶 王英 俞斌杰 王浩

(宁波大学机械工程与力学学院 浙江 宁波 315211)

摘要 针对目前虚拟装配系统交互性差、操作感不强等问题,基于增强现实技术研发一种虚实交互 AR 装配系统。以减速器拆装为例,结合碰撞器与分离轴定理设计的模型间碰撞检测方法,减少在线计算工作量,可实现快速动态装配仿真;基于图像识别提出的触发式脱卡识别方法,解决了传统脱卡识别过程中虚拟模型位置不可控的问题。实验结果表明,该系统不仅能够实现实时虚实交互的装配仿真,而且增强了装配的交互性和操作感。

关键词 虚拟装配 减速器 虚实交互 碰撞检测 触发式脱卡

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.12.019

DESIGN AND RESEARCH OF AR ASSEMBLY SYSTEM FOR REDUCER WITH VIRTUAL REALITY INTERACTION

Liu Li Wang Jing Wang Ying Yu Binjie Wang Hao

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract Aimed at the problems of poor interactivity and weak operational experience in current virtual assembly systems, a virtual and real interaction AR assembly system is developed based on augmented reality technology. Taking reducer disassembly as an example, combining collider and separation axis theorem, the collision detection method between models was designed to reduce online calculation workload and realized fast dynamic assembly simulation. Based on the image recognition, the triggered detachment recognition method solved the problem that the virtual model position was not controllable in the traditional detachment recognition process. Experimental results show that the system can not only realize real-time virtual real interaction assembly simulation, but also enhance the assembly interaction and sense of operation.

Keywords Virtual assembly Reducer Virtual and real interaction Collision detection Triggered detachment

0 引言

机械产品的设计与加工、装配密不可分,好的产品离不开加工和装配的验证。目前,行业内大多采用 Solidworks、UG、Creo 等三维建模软件实现产品设计,加工出成品后,设计人员才能检验设计方案的可装配性和操作性,存在设计、加工和装配脱节的现象。虚拟装配技术将人“沉浸”在计算机中去操作产品模型^[1],对开发前期的设计、装配、验证有重要作用。近

年来,许多学者就虚拟装配的精度、效率、工艺设计、人机交互等方面展开了研究:姚兴军等^[2]开发了基于按钮交互技术控制装配动画播放来指导装配的模具拆装系统。吴青凤等^[3]基于 VB 开发了减速器拆装系统,通过视频形式实现对拆装过程的演示及指导。冯立艳等^[4]开发了基于 Unity 3D 外部插件 iTween 的减速器拆装系统,利用数值插值原理实现减速器自动拆装。魏士松等^[5]利用 Zspace 桌面虚拟现实系统,开发了基于虚拟交互笔控制动画播放及虚拟模型拆装的航天器虚拟维修系统。吴波等^[6]利用 Hololens 和 Unity 3D 实

收稿日期:2021-11-09。国家自然科学基金面上项目(51875294);浙江省高等教育“十四五”教学改革项目(jg20220169);浙江省“十三五”高校虚拟仿真实验教学项目(2021xnfzs014);宁波大学“四新”教学改革项目(SXJXGG2023008)。柳丽,副教授,主研领域:增强现实技术的工程应用,机构设计与分析,精密机械设计。王晶,硕士。王英,副教授。俞斌杰,硕士。王浩,硕士生。

现了对汽车主减速器的虚拟装配。毛玲等^[7]研发层次化模型通用装配算法,结合装配数据库,实现在线虚拟装配。陈果等^[8]利用 C#脚本控制装配动画,借助 HTV Vive 实现钻机虚拟装配系统。

现有虚拟装配系统大多依赖按钮、动画,对增强现实 (Augmented Reality, AR) 技术应用不够充分,仅能实现拆装过程的演示,操作感、交互性差,且需借助昂贵专业设备、固定工作场合等,使用存在诸多不便。

针对上述问题,本文开发了基于 AR 技术的虚实交互装配系统。系统以减速器为对象,手机、PAD 等移动设备为载体,通过配套的简单标记物即可随时、随地开展实践操作。

1 AR 系统开发思路及框架

1.1 系统开发思路

减速器包含箱体、箱盖、齿轮、轴承、套筒、轴等大部分常用机械零部件,其组成涉及支撑、动力传输、密封、润滑等多方面,是经典的机械产品设计入门课题^[3]。在学习中,学生难以理解书本上减速器的空间结构,所设计结构也经常出现拆不下来装不上去等现象。另外,许多高校由于资金、场地及人员等因素限制,无法做到实验设备人手一台,更不可能随时随地开放实验。本文针对当代大学生手机等移动设备普遍的现象,开发了基于移动端 (Android 设备) 的虚实交互 AR 装配系统,主要用于前期的机械产品设计和装配仿真验证。

1.2 系统架构

在基于 Vuforia 的 AR 环境下,利用 Unity 3D^[8-10] 搭建减速器虚实交互 AR 装配系统,其架构如图 1 所示,主要包括数据层、技术层和应用层。应用层,用户利用摄像头捕获标记物等,完成虚实信息的无缝集成,实现装配仿真及虚实交互等,通过手机等显示设备将 AR 场景反馈给用户。数据层主要涉及模型数据、标记物数据、AR 注册数据等三类数据。原始模型数据主要包括减速器各零部件模型的尺寸、渲染贴图及装配位置等数据;标记物数据主要有标记物的尺寸,以及标记物图片经过灰度化、特征点提取和描述后形成的特征数据等;AR 注册数据主要包括在 Vuforia 中生成的标记物位姿信息等。系统开发主要使用碰撞检测、动态加载、脱卡识别、目标识别及路径规划等关键技术。

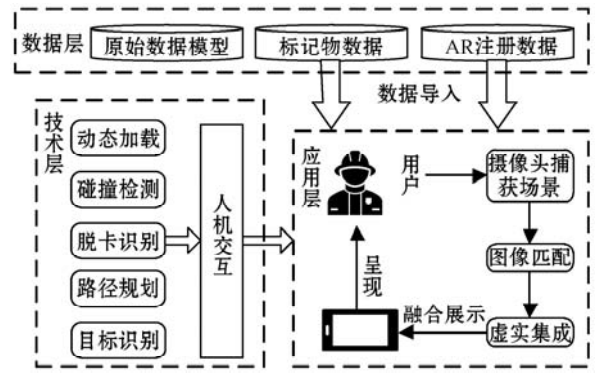


图1 系统架构

2 关键技术

2.1 碰撞检测

本文根据装配过程的要求和特点,设计了两种碰撞检测模式:手与零件模型的碰撞检测、模型之间的碰撞检测。

2.1.1 手与模型的碰撞检测

通过射线检测原理(见图2)来检测手与模型的碰撞。当手指点击屏幕时,系统以摄像机 O 为起点,手指点击屏幕的点(D)为终点发射一条射线。当射线与零件模型(图2黑色立方体)接触后,停止发射射线,向系统反馈所检测零件模型对应的名称、距离模型位置和碰撞点位置等信息。

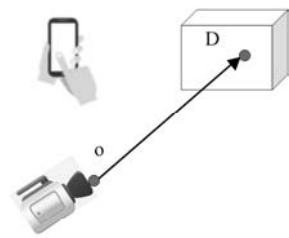


图2 射线碰撞检测

基于手与模型碰撞反馈的信息,系统进一步进行信息动态渲染、动态加载等。碰撞检测流程如图3所示。

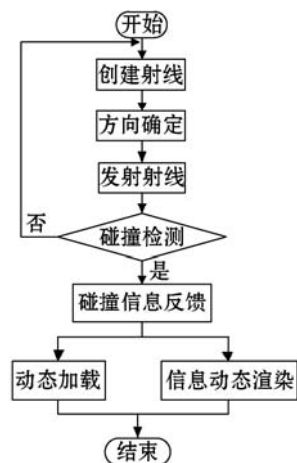


图3 射线检测流程

2.1.2 模型之间的碰撞检测

在装配过程中,如何保证各零件之间相互独立、不发生穿透是装配能否成功的关键。为此,需要检测模型之间的碰撞。而检测两模型是否发生碰撞,最直观的方式在于判断各模型是否发生相交。

在 Unity 3D 中,碰撞检测通过给对象添加碰撞器及刚体组件,并利用自身的物理引擎模拟现实中的碰撞效果,从而达到碰撞检测的作用^[11]。Unity 3D 的碰撞检测可使模型之间不发生穿透,但在装配过程中,若拖动模型的位置超出正确装配位置时,模型之间碰撞发生,已装配零件在碰撞的作用下会被弹开,导致其位置变化,装配关系被破坏。

针对上述问题,本文对模型之间的碰撞检测方法进行优化。Unity 3D 碰撞器的本质是包围盒。检测两包围盒是否相交,经典算法是基于分离轴定理(separating axis theorem, SAT)^[11-12]的测试算法。分离轴测试原理如图 4 所示。

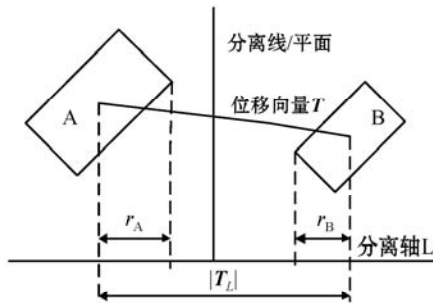


图 4 分离轴测试原理

可以看出,判断物体 A 与 B 是否相交,只需判断 A、B 在某轴上的投影是否重叠。若不重叠,则该轴为分离轴 L,两模型不相交。分离轴测试原理数学模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} |T_L| < r_A + r_B \\ |T_L| = r_A + r_B \\ |T_L| > r_A + r_B \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 是物体 A 中心到物体 B 中心的位移向量, $|T_L|$ 是向量 T 在分离轴 L 上的投影, r_A 和 r_B 分别是 A、B 在分离轴上投影的半径。

若 $|T_L| \geq r_A + r_B$, A 与 B 不相交;若 $|T_L| < r_A + r_B$, 则 A 与 B 处于相交状态。

由上述测试原理可知,该算法存在两方面缺陷:其一,仅能检测 A 和 B 物体都是凸体时的相交状态,而不适用于涉及凹体零件的碰撞检测。其二,对于三维物体而言,需检测 15 条轴来确定相交状态^[11-12],若在 15 条轴上均未相交,则两物体不相交;一旦在某一轴上相交,此时退出测试^[11-12],这导致检测过程的数值运算量庞大,检测效率低,对于零件众多的场景检测延

长了等待时间。

根据减速器装配的特点,本文预设了沿 X、Y 及 Z 轴三个直线方向的拆装路径。然后,提前获取各零件模型碰撞器的中心,并将其储存于集合 C_i 中(其中 i 为各零件模型的英文首字母,例如齿轮为 C_g);根据拆装路径计算零件模型中心 C_i 到其各个表面的距离,并将其储存于集合 D_j^i 中(其中 j 代表上下左右前后六个表面中的任一表面)。根据拆装路径将上述六个面分为三组:第一组上下表面沿 Z 轴方向,记为 u, d ;第二组左右表面沿 X 轴方向,记为 l, r ;第三组前后表面沿 Y 轴方向,记为 f, b 。

由于减速器沿某轴线方向进行装配,实时检测装配过程中,只需检测两零件模型 C_i 间的直线距离 L 是否等于其各自到该方向上表面的距离之和。若等于,则装配成功,模型停止移动;若大于,表示模型未到装配位置,需继续移动;若小于,则两模型发生相交,装配失败。例如装配路径为 X 轴方向时, C_i 到 l, r 面的距离之和为 $D_r^{i1} + D_l^{i2}$ ($i1, i2$ 分别表示两个不同的装配零件),碰撞检测的数学模型见式(2)。

$$\begin{cases} L > D_r^{i1} + D_l^{i2} \\ L = D_r^{i1} + D_l^{i2} \\ L < D_r^{i1} + D_l^{i2} \end{cases} \quad (2)$$

碰撞检测算法流程如图 5 所示。

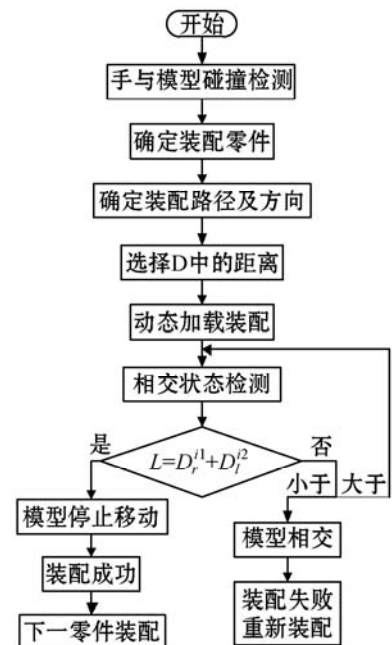


图 5 模型间碰撞检测算法流程

由图 5 可知,本文根据手与模型碰撞后反馈的装配零件信息选择装配路径及方向,再由装配路径选择对应集合 D_j^i ,通过实时检测 L 是否等于 $D_r^{i1} + D_l^{i2}$ 来判断装配是否成功。此时碰撞检测的大量数据在离线状态下计算完成,在线计算量小,检测效率高,并且可有

效解决由模型之间碰撞引起的装配位置变化、模型穿透等问题。

以轴和齿轮装配为例,在轴上添加包围盒碰撞器(见图6中绿色框线),齿轮沿X轴方向从左向右装配,此时齿轮和轴的碰撞器中心分别记为 C_G 和 C_A ; C_G 和 C_A 到装配配合面的距离记为 D_r^G 和 D_r^A 。在装配过程中仅需要判断 C_G 和 C_A 之间的长度 L 是否等于 $D_r^G + D_r^A$,即可判断齿轮和轴的装配状态。

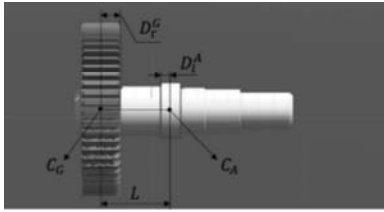


图6 轴和齿轮装配

2.2 脱卡识别

目前基于 Vuforia 实现脱卡识别主要有两种方式:

1) 在 Image Target 的 Inspector 面板勾选 Extended Tracking; 2) 标记物消失时,让虚拟模型成为摄像机或其他物体的子物体,继续保留在 AR 场景中。这两种方法均存在一个缺陷,在标记物移出场景的过程中,模型的位置会发生较大改变,导致模型装配位置关系错误。

脱卡识别的原理是检测真实图片 Y 与数据端图片 X 的相似性。若 X 的特征点集合为 A , Y 的特征点集合为 B , 识别成功阈值为 C 。当且仅当 X, Y 匹配的特征点数目大于或等于 C 时(见式(3)), 图片识别成功。

$$\begin{cases} A \xrightarrow{\text{匹配}} B \geq C & \text{识别成功} \\ A \xrightarrow{\text{匹配}} B < C & \text{识别失败} \end{cases} \quad (3)$$

为提高装配的操作感及设计的交互性,本文设计通过实时移动交互工具带动零件模型运动进行轴系装配。轴作为装配基体,需要稳定显示在场景中,但在装配过程中交互工具易遮挡或推动轴的标记物,导致图像识别失败;或虽能显示在场景中,但模型位置发生较大变化,不方便控制。

此外,虚实交互的装配中,完成某一零件装配后,交互工具需脱离装配场景,待下一零件进入装配。将标记物移出装配场景时,标记物仍在摄像机视野中,特征匹配成功,模型会继续跟随标记物移动;在标记物完全脱离摄像机视野后,图片特征匹配失败时才发生脱卡。但此时模型位置已经跟随标记物发生了持续变化,装配关系被破坏。

针对上述问题,本文对传统脱卡识别方法进行优化。传统图像识别中,模型根据标记物的位姿信息完

成注册,虚拟模型始终与标记物直接关联,导致标记物状态改变时模型的状态变化。

本文设计触发式脱卡识别方法:首先,在标记物与虚拟模型之间构建一个用于传递信息的中间媒体 D , 利用 D 的位置信息来带动虚拟模型,实现模型跟随标记物运动。其次,针对不同零部件设置不同距离作为其脱卡阈值。

对于装配零件,预先设置正确装配位置集合 L'_i 、脱卡阈值 L_T 。然后,实时检测装配零件的具体位置 L_i , 当 L_i 与 L'_i 的距离小于或等于脱卡阈值 L_T 时(式(4)), 标记物脱离模型,只与中间媒体 D 关联,则后续模型位置不再随标记物移动而变化。

$$L_i - L'_i \leq L_T \quad (4)$$

对于装配基体零件,由于系统能够实时检测标记物的状态(包括位置信息,识别状态等),触发式脱卡条件设为:当标记物状态发生改变时,模型脱离标记物。

触发式脱卡识别机制如图7所示。

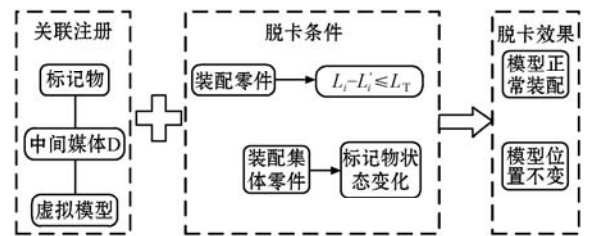


图7 触发式脱卡机制

图7中,关联注册,指在标记物识别成功后在其上方叠加一个透明不可见的中间媒体 D (见图8)。将 D 的位置信息实时赋值给虚拟模型,使虚拟模型借助 D 注册于标记物上方并能跟随标记物移动,但此时虚拟模型仅仅与中间媒体 D 的位置信息绑定在一起,与标记物没有直接绑定。

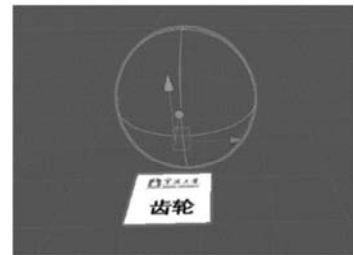


图8 中间媒体 D

关联注册仅仅实现模型跟随标记物移动,并未实现脱卡。以齿轮和轴的装配为例,根据零件类型设置不同的触发式脱卡条件。对于齿轮装配,从集合 L'_i 选取正确装配位置 L'_G , 实时检测齿轮的具体位置 L_G , 并比较 $L_G - L'_G$ 是否小于或等于脱卡阈值 L_T 。若 $L_G - L'_G \leq L_T$, 中间媒体 D 的位置信息停止赋值给齿轮,此时齿轮不再跟随 D 运动,即不跟随标记物运动,标记物的状

态只能影响到中间媒体 D,而齿轮不受其影响自动装配到正确位置;若 $L_C - L'_C > L_T$,则齿轮继续移动直至装配完成。对轴而言,仅需检测标记物状态是否发生变化。若发生变化,中间媒体 D 的位置信息停止赋值给轴,轴稳定显示在当前位置;若没有发生变化,轴依旧显示在标记物上方。

触发式脱卡识别流程如图 9 所示。

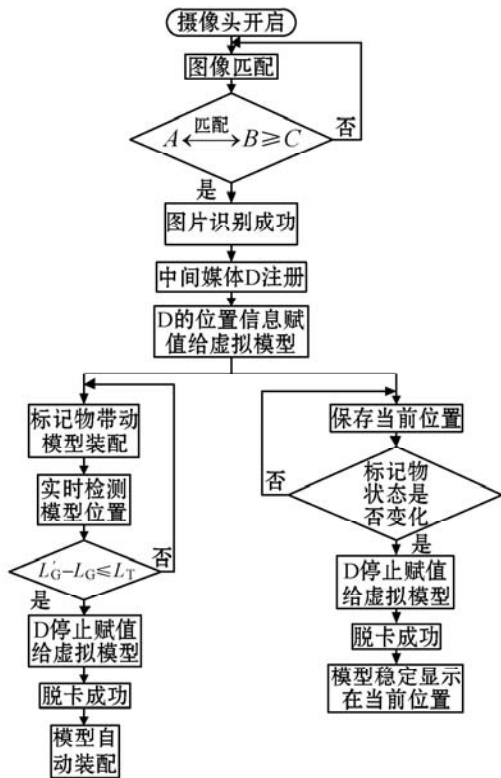
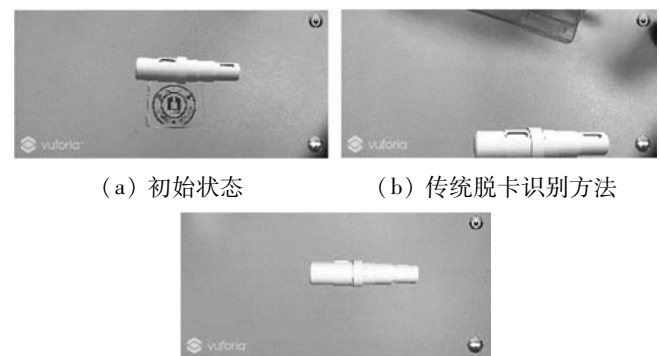


图 9 触发式脱卡识别流程

触发式脱卡识别效果见图 10,其中图 10(a)为轴初始状态,图 10(b)为轴传统脱卡识别效果,图 10(c)为轴触发式脱卡识别效果。优化后的脱卡识别方法,在标记物移出场景过程中,轴的位置稳定不变,可满足后续零件装配要求。



(a) 初始状态 (b) 传统脱卡识别方法

(c) 触发式脱卡识别方法

图 10 脱卡识别优化效果

以上测试结果表明,采用本文设计的触发式脱卡识别方法,在脱卡识别过程中,虚拟模型的位置可控,装配关系不会被标记物的移除破坏。

2.3 动态加载

采用动态加载技术的装配,与传统按钮及动画装配方式不同,它基于碰撞检测后反馈的信息确定是否选中装配零件,并实时读取当前零件的位置信息,利用坐标系转换原理将零件模型坐标转换至屏幕坐标,并基于平移矩阵实时记录模型装配过程偏移量,为提升装配交互性及操作感,以及利用手指拖拽模型进行动态装配等提供了技术支撑。

动态加载流程如图 11 所示。

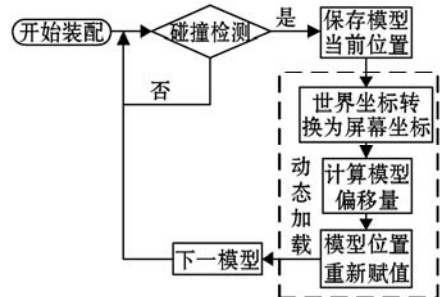


图 11 动态加载流程

2.4 路径规划

由于减速器的零部件较多,空间结构复杂,在拆装过程中,其拆装顺序及路径对最终装配质量起重要作用。本文根据减速器各零部件相对于模型中心的方位,规划其拆装运动路径如图 12 所示,共划分三条路径,分别沿 X、Y 及 Z 轴进行直线拆装。

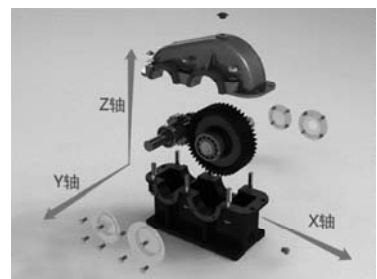


图 12 减速器拆装路径

螺塞和油面指示片等沿 X 轴方向进行左右拆装,闷盖和端盖等沿 Y 轴方向进行前后拆装,箱盖和六角头螺栓等沿 Z 轴方向上下拆装。

2.5 目标识别

目标识别最主要的功能是要确定标记物在真实世界的实时位姿,根据实时位姿将虚拟模型注册于真实世界,实现虚实无缝集成。摄像机位姿可用世界坐标系到摄像机坐标系的 RT 变换^[13]进行表示:

$$T_c = R_{cw} \times T_w + t_{cw} \quad (5)$$

式中: R_{cw} 和 t_{cw} 分别为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转及平移矩阵, T_c 为摄像机坐标系下的 3D 点, T_w 为世界坐标系下的 3D 点。

利用相机位姿即可将虚拟世界的物体实时、精确

地叠加到真实环境中。

目标识别分为单目标和多目标识别。为实现虚实交互,本文基于 Vuforia 提供的多目标识别技术,开发了多目标识别场景。

3 减速器虚实交互 AR 装配系统实现

基于上述关键技术,本文使用 Unity 3D、Vuforia、JavaJDK 1.8.0、Android SDK 及 VS 2017 等开发工具,设计并实现了减速器虚实交互 AR 装配系统。最终将开发好的场景打包成 APK 文件,将其安装在安卓手机中。系统的开发流程如图 13 所示。

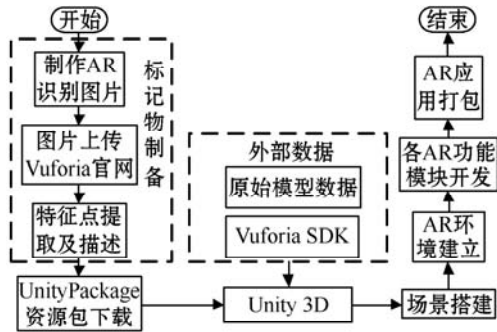


图 13 AR 系统开发流程

图 13 中,原始模型数据主要是利用 SolidWorks 绘制的减速器三维模型,将其导入 3D Max 中进行贴图渲染并转换成 FBX 文件后导入到 Unity 中。从制作 AR 图片到 UnityPackage 资源包下载的过程是标记物制备过程,也是图像识别及 AR 系统开发的基础。图像识别需要经过特征点提取、描述、匹配 3 个步骤。图 14 (a) 为本系统标记物示例原图,图 14 (b) 为检测到特征点的示例图,其中黑色尖锐点为检测到的特征点。



(a) 原图 (b) 特征点

图 14 标记物特征点示例

本系统主要包括三大功能模块:减速器认知学习、减速器拆装及交互设计(见图 15)。

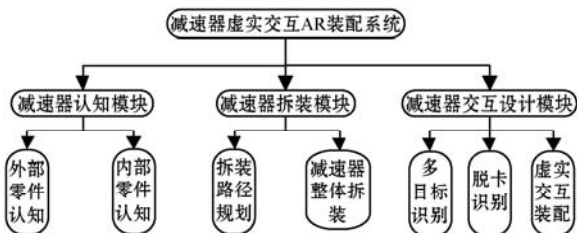
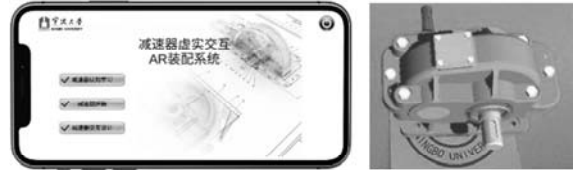


图 15 系统功能模块

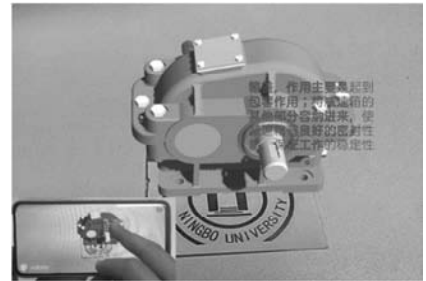
本文采用的实验手机型号为 OPPO Reno,CPU:高通骁龙 710,GPU:Adrone 616,内存:4 GB + 128 GB。用户打开已安装的 APP,系统主界面如图 16(a) 所示。点击减速器认知学习按钮,手机摄像头扫描图 14 所示标记物,识别成功后虚拟减速器模型实时叠加在增强现实场景中,如图 16(b) 所示。



(a) 系统界面 (b) 虚拟模型注册

图 16 系统界面展示

手指点击减速器模型外部零件(如箱盖),信息动态渲染技术根据碰撞反馈的具体零件、点击点的位置坐标等信息,将零件的名称、作用等内容以文字形式实时叠加到该零件上,实现对减速器外部零件的认知学习,见图 17(a)。针对减速器内部零件,利用手指拖拽零件的方式将减速器拆开,即可对减速器内部零件进行认知学习,见图 17(b)。拆装过程中,各零部件按照前述规划的拆装路径进行拆装。



(a) 外部零件认知



(b) 内部零件认知

图 17 减速器拆装、认知效果图

装配过程中主要有两点影响实时性:选择和拖动零件过程中的响应时间、零件运动中的碰撞检测速度。本文选择及拖动螺塞、六角头螺栓、箱盖、端盖和闷盖的响应时间分别为 0.000 2,0.000 3,0.000 7,0.000 4 和 0.000 7 ms,平均值为 0.000 24 ms;碰撞检测时间分别为 0.386,0.417,0.621,0.445 和 0.431 ms,平均值为 0.46 ms,说明系统可以保证装配的实时性。

在减速器交互设计模块,本文设计了手持式交互工具协助用户完成装配,提升装配过程的交互性和操作感,交互工具如图 18 所示。

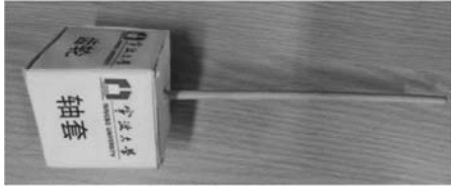
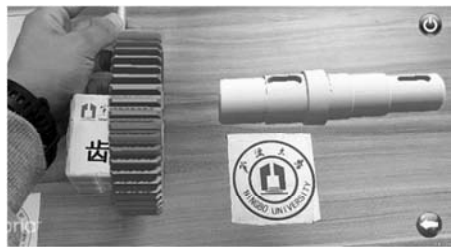
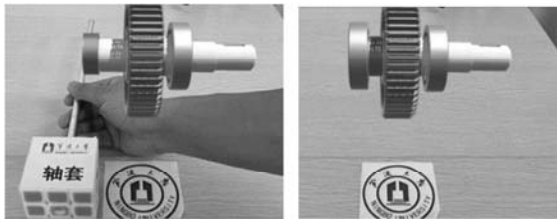


图 18 手持式交互工具

点击主界面的减速器交互设计按钮,根据装配顺序,摄像机依次扫描手持式交互工具上的标记物,对应虚拟零件叠加在增强现实场景中,见图 19(a)。通过移动手持交互工具带动虚拟模型移动,完成轴系的虚实交互装配,见图 19(b)和图 19(c)。



(a) 齿轮装配



(b) 轴套装配

(c) 装配完成

图 19 轴系虚实交互装配效果

系统运行结果表明,碰撞检测算法和动态加载技术能够保证装配的实时性,令学生更直观地理解减速器组成部分、各零部件作用及要求,并对装配顺序、路径、空间结构等概念有了直观的认识,且本文设计的脱卡识别方法能够实现减速器轴系的虚实交互装配,提升了系统的交互性。

4 结 语

本文将增强现实技术应用于减速器装配仿真,根据减速器拆装特点,设计了拆装路径及动态加载技术,实现手直接拖拽虚拟模型进行拆装;基于分离轴定理结合碰撞器设计了一种计算量小且适用于凹体零件的碰撞检测方法,保证装配实时性;通过改进传统图像识别机制设计的触发式脱卡识别方法,不仅能实现利用手持交互工具进行虚实装配,还解决了标记物移除过

程中破坏装配关系的隐患。

参 考 文 献

- [1] 程云,黄瑞,蒋俊锋,等. 基于增强现实的产品质量信息传递方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2019,31(5): 173 - 182.
- [2] 姚兴军,周汉,陈琴珠. 用于指导拆装类教学实验的增强现实体验开发[J]. 实验室研究与探索,2020,39(2):182 - 187.
- [3] 吴青凤,江帆,李东炜. 基于 VB 的减速器拆装虚拟实验系统的开发[J]. 实验技术与管理,2014,31(1):104 - 106,214.
- [4] 冯立艳,关铁成,何世伟,等. 机械基础虚拟实验系统的研究与开发[J]. 实验室研究与探索,2018,37(1):89 - 92.
- [5] 魏士松,周正东,章栩苓,等. 基于桌面虚拟现实技术的航天器虚拟维修训练系统[J]. 系统仿真学报,2021,33(6): 1358 - 1363.
- [6] 吴波,陈春晓,徐劲力. 汽车主减速器虚拟装配中的关键技术研究[J]. 机械设计与制造,2021(9):274 - 278.
- [7] 毛玲,张灵维,章栩苓,等. 面向智能制造的在线通用虚拟装配系统[J]. 计算机工程与应用,2023,59(1):301 - 307.
- [8] 陈果,刘桂芹. 基于 Unity3D 煤矿钻机虚拟装配培训系统开发[J]. 包装工程,2022,43(12):106 - 112.
- [9] An J, Cheng X, Wang Q, et al. Implementation of attractions roaming system based on Unity 3D [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1237(4):042049.
- [10] Lee D M, Shin S J. Real-time visual production using unity 3D [J]. International journal of advanced smart convergence, 2018, 7(4): 2 - 13.
- [11] 白利芳,常朝稳,王禹同,等. 基于有效约束的方向包围盒相交测试算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2016, 28(10):1757 - 1766.
- [12] Gottschalk S, Lin M C, Manocha D. OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection [C]//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM Press, 1996:171 - 180.
- [13] 刘鑫. 面向增强现实的三维跟踪技术[D]. 济南:山东大学,2019.

(上接第 42 页)

- [23] Xiang Z, Peng C, Nong C. A simulation model for airport runway capacity estimation [C]//17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2014:2669 - 2674.
- [24] Chen C, Li C, Qi Y, et al. VEFPP: Visual evaluation of flight procedure in airport terminal [J]. The Visual Computer, 2020, 37:2139 - 2155.