

# 基于 Unity 3D 与自然手势交互的车辆虚拟拆装实验系统<sup>①</sup>

王文峰<sup>②\*</sup> 杨 韶<sup>\*\*</sup>

(\* 燕山大学河北省特种运载装备重点实验室 秦皇岛 066004)

(\*\* 燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

**摘要** 传统的车辆虚拟拆装仿真技术,存在实操感差、交互灵活性低的问题。鉴于此,本文提出了基于自然手势交互的汽车虚拟拆装实验系统和方法框架。通过 Leap Motion 手势识别,构建了车辆拆装虚拟仿真实验平台,提供了发动机拆装、整车拆装、传动系统拆装、制动系统拆装和转向系统拆装模块,实现了拆装过程的仿真和评价。与传统的车辆虚拟拆装方法相比,基于自然手势交互的虚拟拆装方法具有交互性和沉浸性更强的优点,能够最大程度地模拟现场车辆拆装过程,避免实践场地、时间不足的问题。

**关键词** 虚拟现实(VR); 人机交互; 虚拟装配; 手势识别

## 0 引言

随着虚拟现实(virtual reality, VR)技术的发展,如何将其融入到教学中,已经引起了广大学者的重视。越来越多的研究者利用虚拟现实技术构建了逼真的三维模拟环境和交互式动态教学场景<sup>[1,2]</sup>,使学生沉浸到虚拟环境中完成实验和学习。自 2017 年以来,教育部在大力开展示范性虚拟仿真实验教学项目<sup>[3]</sup>。各类仿真教学实验层出不穷<sup>[4,5]</sup>,极大地推动了实验教学的发展。

基于虚拟现实技术的汽车拆装为解决产品设计、装配训练<sup>[6]</sup>等问题提供了一个新的、低成本的快捷手段。代表性的虚拟装配系统有华盛顿州立大学的虚拟装配设计环境(VADE)系统<sup>[7]</sup>、清华大学的 VASS 虚拟装配训练系统<sup>[8]</sup>、浙江大学的 VD-VAS 系统<sup>[9]</sup>等。这些系统主要应用了虚拟现实、增强现实、虚实融合等技术,在人机交互方面效率高、沉浸感强,但需要昂贵的硬件设备支持,如数据手套、位置跟踪器、同步器等。由于硬件价格昂贵,且多数为

特殊应用定制,软件平台不通用,导致该类虚拟装配及训练系统难以在高校实验教学和实训教学中普及和推广。

基于普通个人电脑(personal computer, PC)开发的桌面三维虚拟装配实验系统成本较低,通常采用 WIMP(Windows、Icon、Menu、Point-Click)<sup>[10]</sup>交互范式,通过键盘和鼠标提供精确的指点式输入,操作二维对象,但与三维对象交互时操作复杂,用户体验不佳,不能充分发挥虚拟现实系统的沉浸性和交互性。

近年来,基于体感交互的虚拟装配技术开始得到关注。如廖宏建等人<sup>[11]</sup>提出的基于 Kinect 体感交互技术的虚拟装配实验系统,使用微软的 Kinect 体感器,结合虚拟现实引擎 Unity 3D,实现在桌面系统上架构成本低廉但沉浸感增强的虚拟装配实验系统。它通过采集用户运动空间信息,包括肢体动作、手势、语音、表情等信息作为虚拟装配系统的信息输入,从而使用自然习惯动作完成虚拟装配过程。王朝增<sup>[12]</sup>将基于 Kinect 的动作识别和仿真技术应用到了装配作业的仿真过程当中,实现了人体装配作

<sup>①</sup> 秦皇岛市科学技术研究与发展计划(202004A002),河北省示范性虚拟仿真实验教学(2018XNFZ13)和河北省高端装备产业研究院研究资助项目。

<sup>②</sup> 男,1979 年生,硕士,高级实验师;研究方向:智能车辆,虚拟现实;联系人,E-mail: wangwenfeng@ysu.edu.cn  
(收稿日期:2020-07-13)

业的实时仿真及其人机工效分析。虽然上述体感交互技术一定程度上解决了虚拟装配的可操作性问题,但 Kinect 对于手部精细动作的识别力较差,对于虚拟装配所需的精细动作表现不佳。

针对上述问题,本文提出了一种基于 Unity 3D 软件及 Leap Motion 自然手势交互的车辆虚拟仿真实验平台及虚拟拆装仿真框架。本文第 1 节对系统总体架构进行了概述,第 2 节介绍了各模块的功能,第 3 节对关键技术进行了分析,第 4 节给出了仿真实验结果,第 5 节对本文进行了总结。

## 1 虚拟拆装实验系统总体架构

本文设计的车辆虚拟拆装实验软件系统总体架构如图 1 所示,在主体框架的基础上,搭建人机交互模块、教学模块、装配实验模块和测试评分模块。其中人机交互模块为拆装教学、拆装实验和测试评分模块提供基本的交互方法,原理介绍模块独立于其他模块,主要负责提供基本的原理和拆装标准化作业过程展示。这种模块化的设计架构,除了可以并行同步完成设计开发、提高开发效率之外,还具有良好的拓展性。

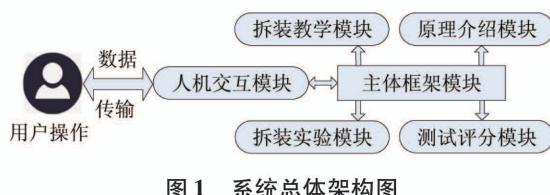


图 1 系统总体架构图

系统开发所涉及的软硬件及具体流程如图 2 所示。其中人机交互模块的硬件为 Leap Motion 或键盘鼠标,Leap Motion 用于对手部的动作进行信息采集和识别,键盘用于必要的操作和输入命令,同时在 PC 端完成人机交互、虚拟拆装场景和过程的算法设计与仿真;模型库、教学模块、拆装模块、测试模块、测试结果和数据库作为拆装软件不可分割的一部分,作为软件系统安装在 PC 主机中,其中模型库由专业的实体建模软件 3DMax 和 CATIA 构成;虚拟场景显示由显示器或 HTC Vive 虚拟现实眼镜构成,用于实现三维虚拟场景的可视化。

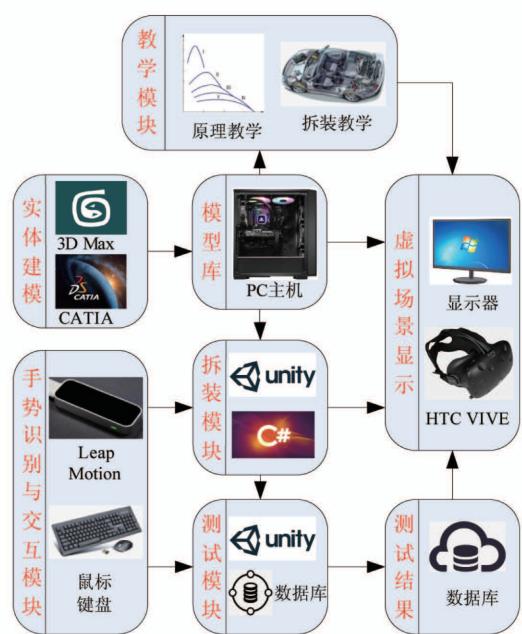


图 2 软件流程图与实现

首先,根据车型和车辆各总成资料,完成原理教学和标准化拆装教学模块的设计;其次,利用 CATIA 或 3DMax 对实际车辆零部件和虚拟场景进行 1:1 的设计和建模,并将建好的模型存放在模型库中;然后,基于 C#语言设计并实现 Leap Motion 自然手势识别算法;最后,在 Unity 3D 平台上完成各个模块的具体编程,包括人机交互的拆装方式、约束设置、步骤提示、虚拟场景在 HTC Vive 中的显示和测试评分等功能。

## 2 系统模块介绍

### 2.1 主体框架模块

主体框架模块结构如图 3 所示。主要包括模型渲染、初始化等工作,这部分是软件的骨架,是软件的入口点,同时主体框架模块具有良好的拓展性和可复用性,留有许多功能拓展接口,比如更新车辆模型、增加操作工具等,为日后完善软件提供条件。

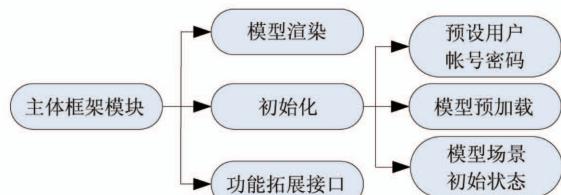


图 3 主体框架模块结构图

## 2.2 人机交互模块

人机交互模块流程如图 4 所示,可以响应用户的鼠标及键盘操作事件,通过鼠标和键盘操作完成对模型的 360° 观察及拆装作业;系统提供的基于 Leap Motion 的精细手部动作识别功能,可以通过 Leap Motion 完成拆装和测评系统的操作实验。

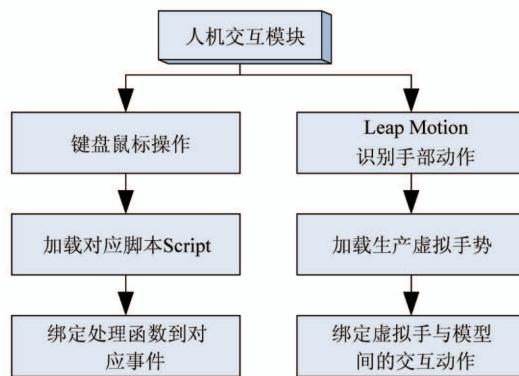


图 4 人机交互模块流程图

## 2.3 原理介绍和拆装教学模块

原理介绍模块主要包括车辆及各总成的工作原理文本知识、视频资料和原理演示视频及动画;拆装教学模块,提供车辆及各总成的标准化拆装过程教学视频和维修手册等内容。该模块的主要功能是指导学习汽车理论、发动机原理和汽车构造等相关内容,熟悉车辆拆装标准化作业过程与自学。

## 2.4 拆装实验模块

拆装实验部分为系统的主体,可以利用 Leap Motion 和 HTC Vive 设备相互配合完成。其中,Leap Motion 提供和真实手部相似的虚拟手以及动作控制;HTC Vive 设备能够赋予更多的沉浸感,可以 360° 观察场景中可操作的车辆或者其组件的模型。该模块提供车辆各部分的 1:1 真实的车辆模型和相关约束,便于对车辆各部件的拆装树立正确的认知。本模块也可以单独通过鼠标键盘完成相关操作,只是沉浸感稍差。

## 2.5 测试评分模块

测试评分模块,通过对操作步骤的正确性和规范性进行评分,测试掌握程度。测试进行时,去掉了拆装步骤的提示部分,完全在相关约束的限制下自由拆卸和安装,每一步都设置相应的分数,操作错误将会扣分,测试出的成绩用来测验掌握程度。

## 3 关键技术及功能实现

### 3.1 模型建立

虚拟拆装系统,需要对车辆各个部件及场景进行规范建模。模型的质量和结构直接影响数据驱动和系统运行的实时性。对具体零部件进行建模的关键在于恰当模型组织结构的确定。建模过程中,依据真实场景中的结构关系及空间位置确定车辆、发动机、动力系统等模型的层次关系,先构建主体架构,再完成部件建模。这样,可以明确建模目标,提高建模效率。

在建模软件方面,使用 CATIA 软件进行车辆整体及零部件部分的建模,部分建模结果如图 5 所示。



图 5 建模效果示例

在模型组织方面,本文采用自上而下、分层次树状的数据结构来组织空间的数据集,并通过场景图把整个场景分割成具有很多层次的节点进行管理,每一个节点代表一个物体本身、物体的相关设置、场景以及和物体的相关联系,这种方式能够非常清晰准确地确定每个物体在场景中的相对位置,层次感鲜明便于确定各个物体之间的联系,有利于实现面向对象的方式来处理。本系统中,每个汽车零件都是一个整体,对其进行上述有效的数据管理,可以实现相关的功能和提高渲染的效率。

### 3.2 手势识别算法

虚拟拆装过程所涉及的手势主要包括 8 种,这 8 种手势动作在 Leap Motion 中的骨架结构如图 6 所示,各个子图代表含义分别是:(a) 双手托,两手掌向上做托举或抬零部件;(b) 双手捧,两手掌掌心相对,捧住某零部件;(c) 单手压,手指向下压钢板等物体;(d) 单手握,手握中螺丝刀等工具;(e) 单手捏,捏住较小的零部件;(f) 单手拉,用手拿起带有把手的物体;(g) 单手抓握,抓握起圆柱型的零部件;(h) 单手拍,通过拍使零部件固定。

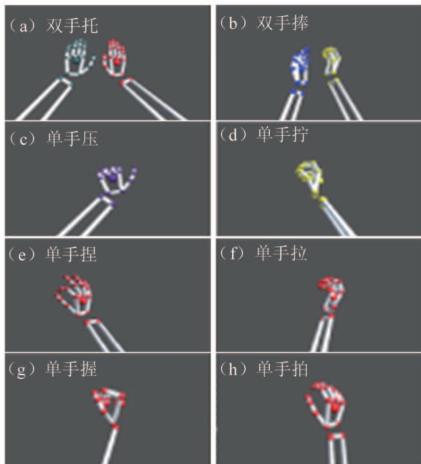


图 6 8 种手势骨架图

本文进行手势识别的过程如图 7 所示。

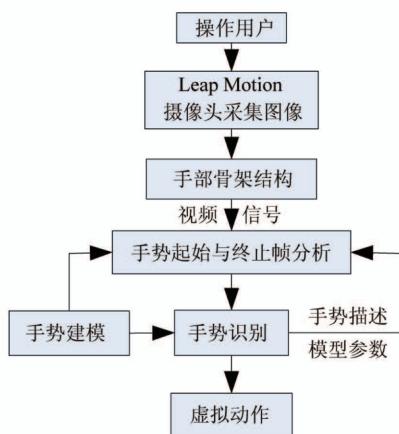


图 7 手势识别过程

首先从 Leap Motion 摄像头中获取手部骨架坐标;然后根据手势模型判断是否为起始或终止的手势(本文定义的起始/终止手势均为自然抓握动作);接下来进行手势分析,本文采用基于隐条件神

经域(hidden conditional neural field, HCNF)的识别算法进行手势识别,其识别原理是<sup>[13]</sup>:

$$\Phi_n(X, Y, S) = \sum_t^k \sum_g \omega_{yt, st, g} h(\theta_{yt, st, g}^T \phi(X, Y, S, t)) \quad (1)$$

$$\Psi(X, Y, S) = \sum_j u_j \sum_t \psi_j(X, Y, S, t, t - 1) \quad (2)$$

其中  $\Phi(X, Y, S, t)$  是  $\phi_k(X, Y, S, t)$  的矢量表示。

$$\Phi_r(X, Y, S) = \sum_K \omega_k \sum_t \phi_k(X, Y, S, t) \quad (3)$$

$\theta_{y, s, g}$  是  $y, s$  和  $g$  的权重向量,  $h(x)$  是门函数。

$$h(x) = \frac{1}{[1 + \exp(-x)] - 0.5} \quad (4)$$

在基于 HCNF 的识别算法中,观察函数  $\Phi_n(X, Y, S)$  有用到门函数  $h(x), P(X | Y)$  可通过式(3)和式(4)导出如下。

$$P(X | Y) = \frac{\sum_s \exp(k(\Phi_n(X, Y, S) + \Psi_n(X, Y, S)))}{Z(X)} \quad (5)$$

其中  $Z(X)$  是分割函数,其表达式为

$$Z(X) = \sum_Y \sum_S \exp(k(\Phi_n(X, Y, S) + \Psi_n(X, Y, S))) \quad (6)$$

在基于 HCNF 的识别算法中,目标函数定义为

$$l(\lambda; D) = - \sum_i \log P(Y^i | X^i) \quad (7)$$

其中  $\lambda = \{\omega_k, u_j\}, D = \{X^i, Y^i\}, (i = 0, \dots, N)$  为训练集。

基于 HCNF 算法可以用于对时间序列的分类,同时 HCNF 算法又可以很好地解决特征之间的非线性问题<sup>[14]</sup>。针对 8 种手势,本文共用 5 名人员参与实验,每人对这 8 种手势分别做 5 次,总次数为 200 次。这样每一种手势都有 25 组对应的数据,选用 15 组数据来进行手势识别的训练,10 组数据来进行手势识别的测试,通过使用 HCNF 分类器对采集的数据进行分类,识别率平均为 86%,可以满足手势识别的需求。手势识别成功后,手势识别系统可以根据手势识别的结果触发特定的拆装动作。如果识别失败,则提示操作者再来一次,直到识别成功为止。

### 3.3 拆装过程实现

在虚拟整车或各总成的拆装方面,需要对整车及各总成进行分解或装配,需要采用碰撞检测算法结合拆装模式,解除或增加各部件间的约束,使其分离或联接。具体地,在拆装过程中,零件 A 和 B 之间的装配关系建立和解除的规则如下。零件 A 和 B 使用 Ray 射线类和 RaycastHit 射线投射碰撞信息类进行零件之间碰撞距离的判断,如果碰撞距离越来越小,直到小于设定阈值,则认为两个零部件之间的装配完成,同时按拆装模式建立两者的装配关系。如果碰撞距离越来越大,并且大于设定阈值,则认为两个零部件之间的装配关系解除。

本文采用两种拆装模式,一种是层次关系模式,另一种是关联关系模式。

在层次关系模式中,按照“拆装设备→要拆装的组件→被子拆装的组件→基本的拆装单元”的层级关系来进行拆装,一个拆装设备能够分成不同层级子级装配体和零件,如图 8 所示。

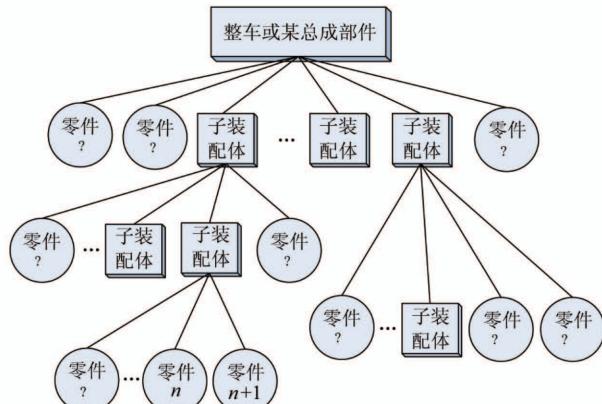


图 8 层次关系图

在关联关系模式中,图中的节点就表示被拆零部件,零部件之间的配合关系使用节点之间的直线来表示,如图 9 所示。

从模式就能够看出,在拆装过程中,经常把相关联的零部件作为一组,拆卸的时候要先把这组件或者部件整体拆卸下来,然后再对其组成零部件进行拆卸。这样就可以把这组零部件组合起来,作为一个新的部件,忽略其中的内部约束。

虚拟拆装,不同于现场拆装的随意性和机动性。虚拟拆装需要设置严格的操作步骤和操作工序,并

在每个零部件间按需要设置严格的约束和限制,零部件不能随意放置,使用工具必须选择恰当,否则在拆装测试模块都会相应减分。零件的自由度在未完全约束前,装配导航规则采用遍历加循环的方式获取每一个零件信息,对发动机零部件进行分级规划;接着使用人机交互式拆卸法根据顺序导引确定装配序列。拆卸分层依据自顶向下的原则进行,选取的节点只有其上层节点拆卸完毕情况下才能被拆卸,此方法可避免任意拆卸零件带来的逻辑混乱。

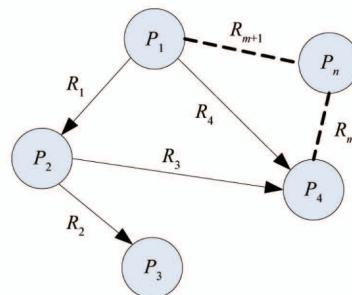


图 9 关联模式图

### 3.4 拆装评分机制

对装配过程进行评分,评分包括基础分和加、减分。

(1) 基础分的评分标准。拆装实验前的准备,选择正确的拆装工具和专用工具。选择同一层级的部件,规范的放置拆卸的部件。当工具选择正确时,评分为 1 分;当拆装部件的顺序正确且操作手势正确时,评分为 2 分。

(2) 加、减分的评分标准。连续规范作业,过程中没有错选工具、错选部件,且拆装位置正确可以加分。连续正确的步骤越多,加分就会越多,否则会在基础分上减分。多个部件的总得分单独计算,最终根据各部分的分数加权计算总得分。

## 4 仿真结果及系统实现

基于上述关键技术,本文实现了车辆虚拟拆装实验教学系统的仿真,系统主界面如图 10(a)所示。

通过系统中的原理介绍(如图 10(b))和拆装教学(如图 10(c))模块,引导学习汽车运行机理,并进行标准化作业,为虚拟拆装打好基础;拆装实验

部分提供了几种典型车辆及其主要总成的详细拆装模拟实验(如图 10(d) 和(e)所示),操作者根据操作步骤和工具说明,结合教学部分,可以快速熟悉整个拆装的流程,并可以反复进行模拟拆装,直到熟练掌握所有拆装步骤并能进行独立拆装工作;测试部分,系统提供可以独立操作的模拟拆装测试环境(如图 10(f)),提供统计操作正确、错误记录和评分功能,提供拆装测试和成绩评定功能,可以辅助操作者了解自己的拆装水平。



图 10 系统主要模块界面截图

为了提高拆装过程的沉浸感,系统提供了交互式沉浸式虚拟拆装模式,操作者可以佩戴 HTC Vive 头戴式显示器,头盔前端固定 Leap Motion,通过 Leap Motion 采集手部精细动作来完成相应的操作。在虚拟拆装之前,首先需要进行设备校准,通过虚拟手势校准识别出相应的动作,然后进行拆装模拟,如图 11 所示。本文中,通过虚拟手控制虚拟部件可以完成零部件搬运、旋转、移动、安装等操作,并最终实现拆装过程的模拟。

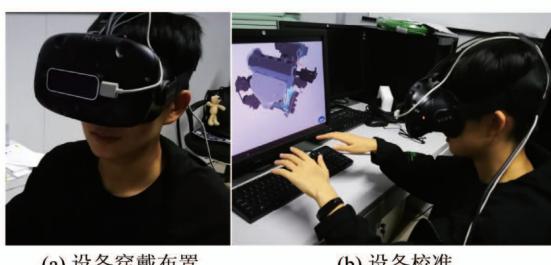


图 11 设备布置及校准

以拆卸发动机为例,具有同一层级关系的总成和零件间没有约束,可以根据需要选择拆卸相关的部件;具有不同层级关系的部件,在拆卸时,必须按照强约束关系按照步骤拆卸。如图 12 所示步骤 1 是虚拟发动机整体模型,主机体最外一层的部件没有强约束,可根据需要拆卸不同的部件。

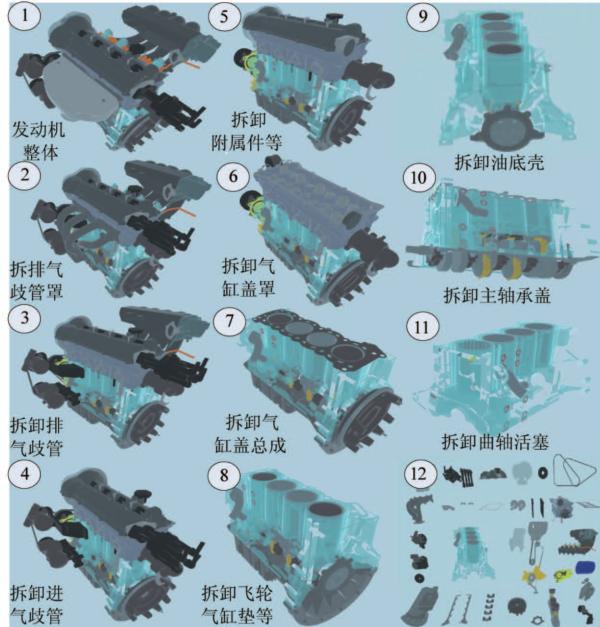


图 12 发动机拆卸过程

在下一级物体的拆卸时,必须遵守先子物体、再父物体的关系进行拆卸,例如在拆卸排气歧管总成时(步骤 2 和 3),必须先拆下排气歧管罩,然后才能拧松排气歧管上相应的螺母,进而拆卸排气歧管总成。其他部件的操作类似,拆卸完排气歧管后可以进行步骤 4 或 5,拆卸进气歧管总成和其他主要附件,主要包括转向助力器、空调压缩机、发电机、水泵带轮、分电器及点火线圈等。然后进行机体的拆卸,拆卸气缸盖罩 6,拆卸气缸盖总成 7,接下来拆卸气缸垫和飞轮 8 等部件,然后再拆卸油底壳、后油封 9 等,最后进行步骤 10 和 11,拆卸曲柄连杆机构。这样,整台发动机就被拆卸完毕。拆卸操作演示如图 13 所示。装配过程与拆卸过程相反。

## 5 结 论

本文实现了基于 Leap Motion 自然交互手势识别的车辆虚拟拆装实验平台构建。该平台提供了发



图 13 拆卸操作演示

动机拆装、整车拆装、传动系统拆装、制动系统拆装和转向系统拆装模块,实现了拆装过程的评分,有利于在高校中开展拆装虚拟实验教学。不足之处是现有系统在手势识别算法准确率方面仍有误识别现象发生,而且 Leap Motion 的操作范围受限,今后的研究将考虑利用新的算法,提高手势识别准确度。

#### 参考文献

- [1] 文国军, 夏雨, 王玉丹, 等. 基于 Unity 3D 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):61-67
- [2] 于宏文, 单琦, 项阳. 基于 Unity 3D 的节能车虚拟装配系统的设计[J]. 上海工程技术大学学报, 2018, 32(2):121-126
- [3] 教育部办公厅. 教育部办公厅关于 2017-2020 年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知(教高厅函[2017]4 号)[Z], 2017
- [4] 吴振铭, 张瑞杰, 何富君等. 汽车手动变速器虚拟仿真实验教学系统设计[J]. 科学技术创新, 2020(18):165-166
- [5] 熊巍, 何蔚珊. 基于 Unity3D 的化学虚拟实验系统设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(2):28-31
- [6] Liu F, Lu Y K, Zhang S X. A pragmatic system to support virtual assembly for military armored vehicle integrated transmission system in the virtual environment [J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 102:1337-1354
- [7] Brough J E, Schwartz M, Gupta S K, et al. Towards the development of a virtual environment-based training system for mechanical assembly operations [J]. *Virtual Reality*, 2017, 11(4):189-206
- [8] 夏平均, 陈朋, 郎跃东, 等. 虚拟装配技术的研究综述 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(8):2267-2272
- [9] 万华根, 高曙明, 彭群生. VDVAS:一个集成的虚拟设计与虚拟装配系统[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(1):27-35
- [10] Jacob R J K, Girouard A, Hirshfield L M, et al. Reality-based interaction: a framework for post-WIMP interfaces [C] // Proceeding of the 26th Sigchi Conference on Human Factors in Computing Systems, New York, USA, 2008:201-210
- [11] 廖宏建, 曲哲. 基于 Kinect 体感交互技术的虚拟装配实验系统开发[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(7):98-102
- [12] 王朝增. 基于 Kinect 的装配仿真及其人机工效分析 [D]. 杭州:浙江理工大学机械与自动控制学院, 2014: 2-7
- [13] 孟祥宇. 基于 Leap Motion 的人机交互技术的研究 [D]. 天津:天津大学电子信息工程学院, 2015: 29-33
- [14] 黄俊, 景红. 基于 Leap Motion 的手势识别在虚拟交互中的研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(4): 1-5

## Virtual vehicle disassembly and assembly system based on Unity 3D and natural gesture interaction

Wang Wenfeng\*, Yang Tao\*\*

(\* Hebei Key Laboratory of Special Delivery Equipment, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

(\*\* School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

### Abstract

The traditional virtual disassembly and assembly simulation technology of the vehicle has the problems of poor practical operation and low interactive flexibility. A virtual automobile disassembly experimental system and framework based on natural gesture interaction is proposed. Through gesture recognition using Leap Motion, a virtual simulation experimental platform for vehicle disassembly and assembly is constructed. The modules of engine disassembly, vehicle disassembly, transmission system disassembly, brake system disassembly and steering system disassembly and assembly are provided, and the simulation and scoring of disassembly and assembly process are realized. Compared with the traditional vehicle virtual assembly method, the virtual disassembly method based on natural gesture interaction has the advantages of stronger interactivity and immersion. It can simulate the process of vehicle disassembly and assembly to the greatest extent, and avoid the problem of insufficient practice site and time.

**Key words:** virtual reality (VR), human computer interaction, virtual assembly, gesture recognition