

航天产品装配作业增强现实引导训练系统及应用*

尹旭悦¹, 范秀敏¹, 王磊², 邱凯², 刘睿¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;

2. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

[摘要] 航天产品的品种多、批量小、装配工艺要求高且以手工装配为主,对装配操作者提出了很高的要求。针对航天产品在生产过程中操作者装配引导训练的需求,分析了产品拆装工艺操作流程和现场状态信息,提出了面向增强现实装配引导的工艺信息建模方法,在计算机视觉识别和三维环境感知技术基础上,研制了包含装配作业现场操作指导、关键部件检验记录功能的一体化训练系统,为装配操作者提供智能辅助支持,有利于提高航天产品生产效率。

关键词: 增强现实; 机器视觉; 状态识别; 手工装配; 装配引导

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.048



尹旭悦

博士研究生,主要研究方向为工业增强现实及其相关技术。

增强现实(Augmented Reality, AR)是将计算机生成的虚拟图形以正确的视点投影到人眼所见的真实世界影像上,在视觉上为人提供补充信息。波音公司在20世纪90年代首次用AR辅助飞机舱体布线,显著提高了复杂线缆布置的装配效率和准确率。此后国外企业及研究机构对基于AR的现场工艺指导技术进行了大量研究及应用。波音公司后续开发了基于AR的Boeing737引擎装配及故障检修系统,提高装配效率约20%,提高一次装配正确率约24%^[1]。西班牙空客军用飞机公司以A400M军用运输机为应用对象,使用AR装配辅助系统解决了装配步骤繁琐、纸质装配工艺质量文件管理困难、缆线装配整体规划可视性差等实际问题,结合飞机设计过程中基于产品CAD模型及其特征信息建立的数字样机开发了智能装配引导系统,缩

短装配制造周期约50%^[2-3]。尽管增强现实系统可提供虚实融合的操作引导场景,提高工艺操作人员对工艺的理解效率,其虚拟信息显示仍需要由使用者主观发出指令来控制^[4],交互效率低、自动化程度不高,制约了AR技术在单个工位具有多道装配工序的产品上的应用。为改善AR操作辅助引导系统的交互方式,研究人员通过采集真实作业环境及过程信息辅助AR操作引导系统进行决策,执行引导信息的精准推送。Zhu等^[5]提出综合机床温度、转速的传感器信息为维修人员提供虚拟菜单,使用者通过手势与虚拟菜单的交互查询维修指令,实现在现场无纸化作业,该方法虽然改善了现场产品数据可视化和交互方式,然而仍需要人来主观判断操作状态,做出交互指令。另一类方法是研究操作人员手工操作动作,事先采集一部分操作经验数据

* 基金项目: 上海航天技术研究院-上海交大航天先进技术联合研究中心资助项目(USCAST2015-17)。

对其进行学习和建模,获得操作行为的识别模型,之后在真实操作时用此模型判断操作者工作状态,进行虚拟信息的自动更新。Webel等^[6]使用六自由度力矩传感腕带识别操作过程中人手是否处于正确的操作状态,当腕部操作力矩或方向有误时,腕带释放力反馈信号,提示操作者在平板电脑上观看虚实融合操作引导训练信息。Bleser等^[7]通过穿戴摄像头和惯性传感器构成的穿戴传感网络,采集工艺操作过程中操作者手部位置和操作对象物体数据,使用隐马尔科夫模型和多元支持向量机对采集数据进行训练,获得操作序列识别预测模型;在进行工艺操作训练时,用该模型实时识别并预测操作序列更新,在增强现实眼镜中为操作者提供增强现实操作引导信息。Petersen等^[8]使用视频图像序列相似度函数对维修操作样本视频进行分割标记,通过操作手区域肤色识别获得操作引导视频掩膜,在线引导时,通过图像相似度判断装配进度,在增强现实眼镜中显示带有透明度的操作引导视频。以上方法虽实现了通过操作者的动作状态进行交互意图判断及自动信息推送,然而未考虑装配现场作业中零件、产品状态信息及操作顺序、重复动作操作等情况难以准确识别的问题。

航天产品(如导弹)具有多品种小批量的特点,其内部结构复杂、装配操作工艺执行方式为手工作业、操作步骤繁复、装配过程质量管控严格,通常要求“双人单岗”在现场进行装配作业,作业质量与操作人员的工艺熟练程度和技艺水平密切相关。然而,现场操作人员对工艺的理解和操作熟练度属于人为主观因素,以人工经验为主导,为产品质量管控带来巨大挑战。目前,大部分工艺说明文件以纸质文件为主,可视化程度不高,可理解性、指导性有待增强;熟练装配人员的作业经验和良好操作

习惯难以量化表达,不利于经验知识的传承;在生产过程中,对原始工艺执行、检验信息记录及数据管理仍以文件记录为主,容易造成疏漏;产品装配履历文件以纸质文件为主,信息难以检索,产品数据可溯性差^[9-10]。综上所述,复杂航天产品装配生产亟须面向手工装配作业的自动化检测引导辅助方法与系统。

针对上述问题及需求,本文提出并实现了一种航天产品装配作业增强现实引导训练系统(Augmented Reality based Assembly Process Guidance & Training System, AR-APGTS)。为提高增强现实引导信息触发机制的自动化程度、减少装配人员对系统进行交互控制的工作量,系统采用了面向增强现实装配引导的工艺信息模型,在计算机视觉识别和三维环境感知技术的基础上,建立了操作现场动静态信息识别模型,研究了信息模型驱动的自动引导机制,开发了包含装配作业现场操作指导、关键部件检验记录功能的一体化训练系统。最后,以模拟的航天产品装配操作环境为例,对所提出的方法进行应用验证。

航天产品装配操作引导训练系统结构

航天产品装配制造环节中,对新型号、新批次产品,装配操作人员需要通过纸质工艺文档或二维电子工艺文档进行工艺学习。传统工艺训练方法的工艺内容表达不直观,二维文档与生产现场产品对应关系不明确,查询和试装配的方式缺少装配质量信息的即时反馈,学习效率不高。为提高装配工艺操作引导训练系统的效率,本文采用多元视觉识别信息判断工艺操作状态和工序进度,自主决策在虚实融合场景中显示或更新引导信息。为支持产品装配质量的可溯性,部分工艺检验点根据视觉装配状态,识别信息

自动保存工艺操作完成后关键部位或产品的图像。综上,本文研究提出的航天产品装配操作引导辅助系统主要包括如下功能:

(1)支持多元现场操作视觉信息的识别。航天产品装配工艺操作步骤繁多,首先需要对结构化工艺信息中的视频和图像数据进行特征提取和学习,获得操作行为、操作对象、检验点的视觉识别模型,用于在线操作信息的识别。在执行装配作业时,使用摄像头采集操作现场实时图像数据,通过离线训练的视觉识别模型,识别工艺操作动作行为、零件对象、产品检验状态等现场操作信息。

(2)支持引导需求和操作序列更新的自主决策。根据视觉识别信息和已知的装配工艺工序流程,建立操作状态和操作序列分析逻辑,判断引导需求及操作序列进度。

(3)支持模型驱动的工艺可视化内容生成。为节约资源开销,通过决策信息调度当前工序相关的模型资源和仿真工艺信息,根据实时感知的操作环境空间定位结果,进行渲染和投影,并生成虚实融合的引导视图。

(4)支持检验点图像信息自动存储。当工序中存在检验点,且操作状态为当前工序完成的时刻,自动保存检验点的图像,并存储到结构化工艺信息模型,以便质量回溯。

(5)支持引导内容的虚实融合可视化输出。通过可穿戴设备向工艺操作人员提供虚实融合的动态装配操作工艺引导信息。

根据上述描述设计增强现实训练引导系统总体结构,如图1所示。系统结构主要包括工艺操作现场、现场信息感知、控制决策、增强现实场景管理、工艺数据管理5项内容,其中现场信息感知、决策、增强现实场景管理为系统的核心功能;工艺数据管理作为数据支撑,为核心功能提

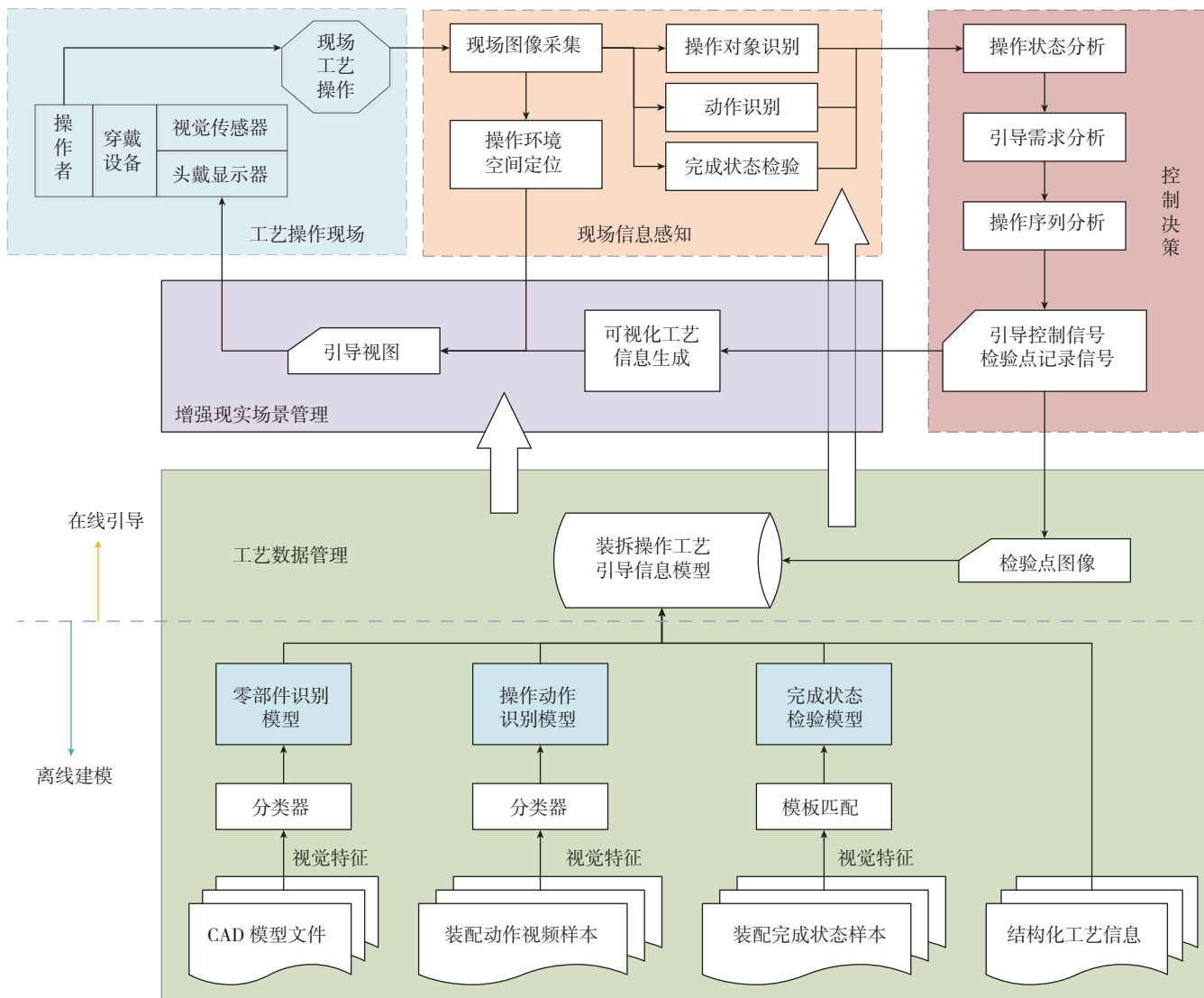


图1 增强现实装配操作引导训练系统结构

Fig.1 Structure of augmented reality based assembly guidance and training system

供信息处理模型；工艺操作现场主要由图像传感设备、显示设备、处理器、工装环境等构成，为工艺操作人员提供工艺操作引导环境设施。

结构化装配工艺引导信息建模

本文研究采用结构化工艺设计方式将装配工艺过程涉及的工艺数据、物料数据、三维模型数据、操作过程视频数据、检验点图像数据、工艺仿真数据等各类装配工艺信息按类汇总，建立了系统结构化装配工艺模型(见图2)，按照相应标准和企业需

求输出相应格式的结构化装配工艺文件。信息存储过程中，各类装配工艺信息采用结构化和面向对象化的方式进行存储，以便于后续各种数据的自动汇总和输出，及与其他系统的信息集成。

装配状态视觉在线识别

对装配手工工艺操作作业，现场信息主要由操作零部件对象、操作过程动作、操作完成状态3类信息构成。使用头戴摄像机跟随操作人员视点采集现场图像信息，进行并行识别处理，获得现场信息。

零部件对象识别要求在线识别装配操作对象零部件型号。在离线建模阶段采用形态学处理提取零部件样本图像的零部件区域图像，如图3所示。

预处理后，提取区域图像的SIFT特征描述，在SVM分类器中对描述子进行分类训练，获得分类器参数作为识别模型。在线识别零部件型号时，对实时采集的图像进行相同的图像预处理和特征检测处理，将待检测图像的特征描述输入识别模型，获得识别零件型号结果，实现过程如图4所示。

装配操作动作识别要求在线识别操作者是否正在执行安装/拆卸动作。本文采用装配操作手势几何特征时域空间概率分布拟合的方法识别装配操作动作^[1]。在离线建模阶段对操作过程样本视频进行肤色检测,对图像中的人手区域进行特征提取,训练识别模型,优化识别模型参数。在线进行操作动作识别时,对实时采集的图像进行相同的区域分割和特征提取处理,获得操作动作状态。此过程如图5所示。

装配操作完成状态识别:针对关键零部件装配情况进行检验,保证装配工序中没有漏装、装错重要零件。本文采用三维约束下图像特征点匹配的方法检验工艺操作完成状态。首先,从装配引导工艺模型中获取当前操作步骤检验点下样机试装时的检验目标图像,将其作为匹配检验的样本图像。之后,在引导信息建模阶段将样本图像的检测区域选出,保存为匹配模板信息。在线实施检测时,将操作现场传感器采集的图像数据与模板图像关键区域进行特征点匹配,当符合三维约束关系的匹配特征点描述子的平均欧式距离小于设定阈值时,判断关键部位检验合格。

增强现实引导自动控制

根据现场多元装配状态信息识别结果进行可视化需求判断,生成可视化内容显示控制信号;根据零部件对象识别结果定位工艺操作序列进度,调用结构化工艺信息模型中当前操作步骤的工艺引导文字信息内容、图纸信息、三维动态仿真信息,渲染生成虚实融合的可视化工艺引导视图,方法流程如图6所示。对固定装配工位应用场景,本文采用基于标记物标定装配工作空间的方法进行三维引导工艺虚实注册^[4],避免装配工作空间与摄像机跟踪场景注册标记物的视锥空间发生冲突。

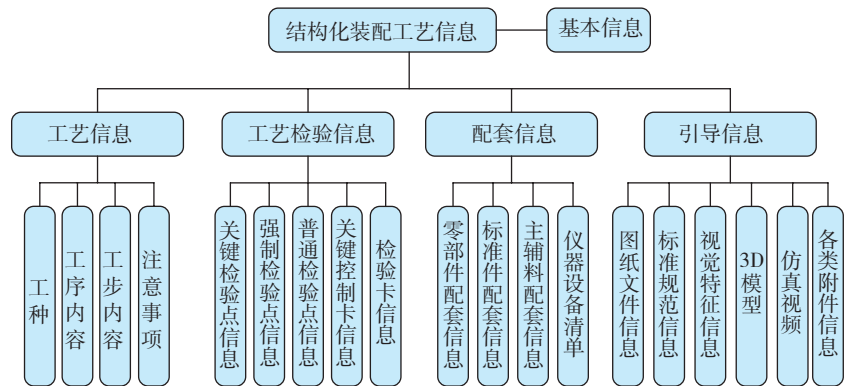


图2 结构化装配工艺信息模型

Fig.2 Structured assembly process information model

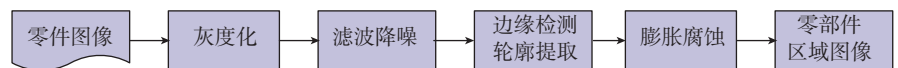


图3 图像预处理提取零件区域

Fig.3 Pre-processing method for part image region extraction

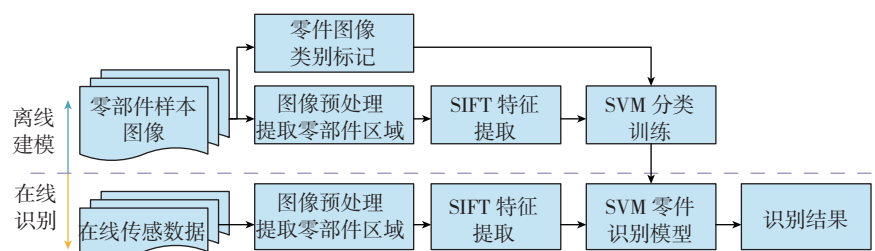


图4 操作零部件对象识别过程

Fig.4 Method of assembly part object recognition

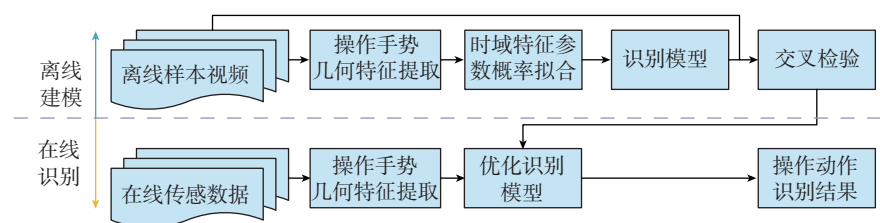


图5 操作动作状态识别过程

Fig.5 Method of assembly operation recognition

应用案例

以模拟的航天产品舱体模型电连接器安装及检验步骤作为上述增强现实装配工艺引导训练系统AR-APGTS的应用实例。通过增强现实引导的方式训练无该产品装配经验的操作人员将工艺要求的电连接器零件安装到正确的装配孔中,并记录装配操作过程和装配完成后的检验图像,对所提出的方法进行验证。

首先在AR-APGTS软件界面录入工艺数据信息,记录操作工序及视觉识别训练所需的样本图像、视频文件,如图7(a)所示;之后进行虚拟装配工艺规划,生成动态三维工艺仿真路径文件(图7(b));然后依次进行零部件识别模型训练、装配操作动作识别模型训练、装配完成状态检验模板生成,如图7(c)、(d)、(e)所示。以上信息共同支持在线装配状态视觉识别。

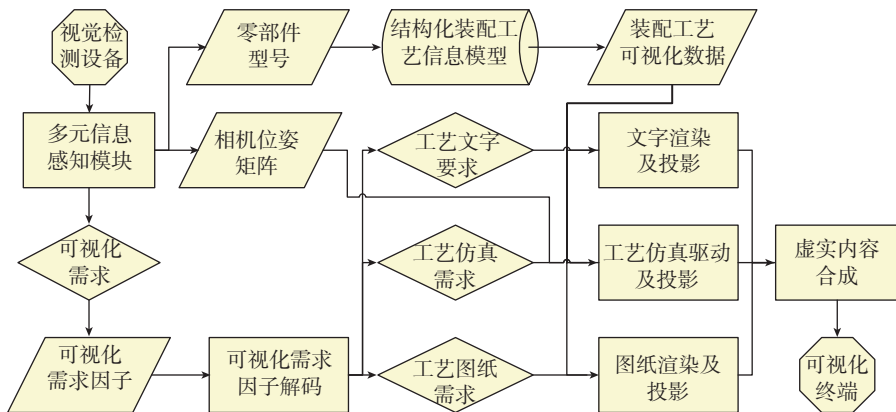
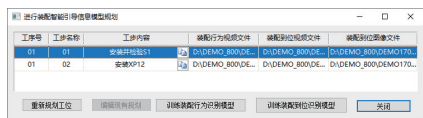
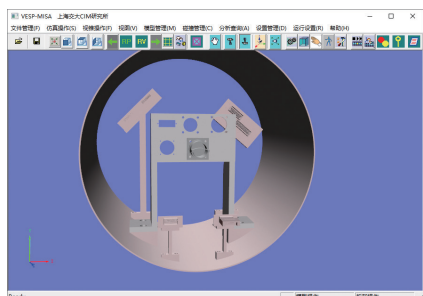


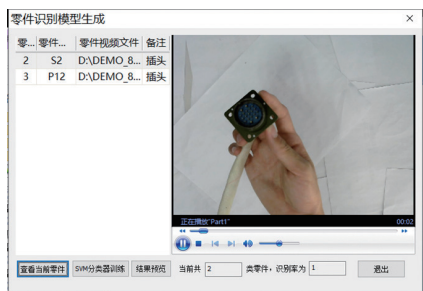
图6 信息模型驱动自动可视化引导机制
Fig.6 Strategy of model driven AR guidance visualization



(a) 装配工艺数据信息管理



(b) 虚拟装配工艺规划



(c) 装配零件识别模型训练



(d) 装配操作动作识别模型训练

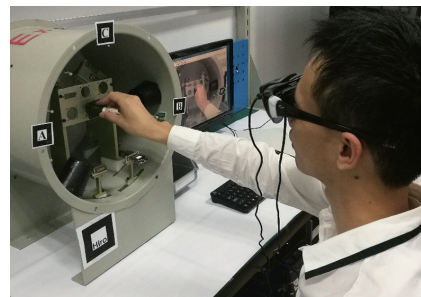


(e) 装配完成状态检验模板生成

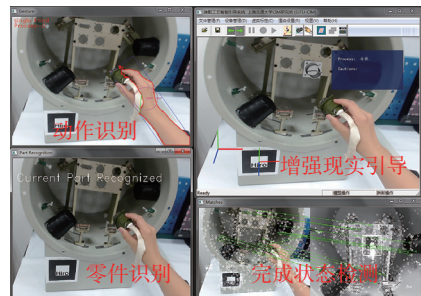
图7 装配操作工艺引导信息建模过程
Fig.7 Assembly process guidance information modeling

在线进行装配操作引导培训时，操作者佩戴 VUZIX STAR 1200X 光学透视增强现实眼镜观看虚实融合的装配引导情景，包括文字说明、工艺过程仿真动画，如图 8 (a) 所示。本系统支持光学透视与视频透视引导界面同步输出，在对操作人员进行

示教时，其他操作者可同步观看显示器中提供的操作现场视觉识别信息和引导信息，如图 8 (b) 所示。操作结束后，可在查看界面对操作过程中的时间、装配完成状况、操作过程视频进行查看，如图 9 所示。在增强现实引导系统的辅助下，装配操作人员



(a) 增强现实引导操作现场配置



(b) 识别与引导信息可视化输出

图8 增强现实装配作业引导训练场系统运行效果

Fig.8 On-line running effects of AR assembly guidance and training system



图9 工艺操作过程信息查看

Fig.9 Review on recorded assembly operation process information

可直接找准装配位置，减少阅读手册与对照实际产品的时间，同时在装配过程中，系统根据装配操作状态自动显示或隐藏提示信息，长时间未完成装配步骤时会及时显示引导信息，动作进行时则隐藏信息，不遮挡操作视线。

结论

针对航天产品多品种、小批量且

对装配操作者要求高的特点,以及现阶段三维装配工艺可视化引导系统使用过程中交互频繁、影响工艺执行效率的问题,基于计算机视觉和增强现实技术,提出并实现了一种增强现实装配作业引导训练原型系统,通过系统在线感知装配现场操作信息,自动控制向使用者输出虚实融合的装配工艺引导信息,提高了装配工艺的指导性、装配过程的可控性、装配质量的可溯性。与传统工艺手册指导、电子工艺说明书指导的方式相比,主动式增强现实引导提高了装配工艺训练效率,缩短了装配技术人员的上岗时间,为各航天产品型号配套产品生产装配环节的质量提供通用保障措施,为人工操作数字化、规范化提供通用技术方法。

参考文献

- [1] RIOS H, GONZÁLEZ E, RODRIGUEZ C, et al. A mobile solution to enhance training and execution of troubleshooting techniques of the engine air bleed system on Boeing 737[J]. *Procedia Computer Science*, 2013, 25: 161-170.
- [2] SERVÁN J, MAS F, MENÉNDEZ J L, et al. Assembly work instruction deployment using augmented reality[J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 502: 25-30.
- [3] SERVÁN J, MAS F, MENÉNDEZ J L, et al. Using augmented reality in AIRBUS A400M shop floor assembly work instructions[C]// *Proceedings of the 4th Manufacturing Engineering Society International Conference (Mesic 2011)*. Melville: AIP Publishing, 2012.
- [4] YIN X, GU Y, QIU S, et al. VR & AR combined manual operation instruction system on industry products: a case study[C]// *Proceedings of 2014 International Conference on Virtual Reality and Visualization*. Shenyang, 2014: 65-72.
- [5] ZHU J, ONG S K, NEE A Y C. An authorable context-aware augmented reality system to assist the maintenance technicians[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(9-12): 1699-1714.
- [6] WEBEL S, BOCKHOLT U, ENGELKE T, et al. An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61(4): 398-403.
- [7] BLESER G, DAMEN D, BEHERA A, et al. Cognitive learning, monitoring and assistance of industrial workflows using egocentric sensor networks[J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0127769.
- [8] PETERSEN N, STRICKER D. Cognitive augmented reality[J]. *Computers & Graphics*, 2015, 53: 82-91.
- [9] 刘洋, 徐寅, 王津, 等. 航天数字化装配工艺研究[J]. *现代制造技术与装备*, 2016(4): 63,78.
- LIU Yang, XU Yin, WANG Jin, et al. Research on digital assembly technology of aerospace[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2016(4): 63,78.
- [10] 唐宏亮, 熊美. 航天产品装配工艺三维可视化及生产过程数字化技术研究[C]// *2011 中国航天科技集团公司数字化制造论坛论文集*. 北京, 2011: 237-243.
- TANG Hongliang, XIONG Mei. Research on visualization and digitalization technology of aerospace product assembly process[C]// *Proceedings of CASC 2011 Digital Manufacturing Technology Forum*. Beijing, 2011: 237-243.
- [11] 尹旭悦, 范秀敏, 顾岩, 等. 动态视觉手势识别下手工装配时序控制的智能防错方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(7): 1457-1468.
- YIN Xuyue, FAN Xiumin, GU Yan, et al. Sequential dynamic gesture recognition controlled poka-yoke system for manual assembly[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2017, 23(7): 1457-1468.

通讯作者: 范秀敏, 教授、博士生导师, 研究方向为虚拟现实/增强现实应用、数字化装配与仿真维修、数字化工厂技术等, E-mail: xmfan@sjtu.edu.cn.

Augmented Reality Training System for Aerospace Product Assembly Process Guidance and Its Application

YIN Xuyue¹, FAN Xiumin¹, WANG Lei², QIU Kai², LIU Rui¹

(1. School of Mechanical and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

[ABSTRACT] Aerospace products with many varieties, small quantities and high assembly process requirements, are usually assembled manually, which brings a very high demand on assembly operators. In order to provide cognitively comprehensible assembly operation guidance for operators, both operation instruction and on-site operation experience have been analyzed, and then a process information modeling method for on-site aware augmented reality (AR) operation guidance system has been studied. On the basis of computer vision techniques of object recognition, behavior recognition and 3D object tracking, a prototype system for aerospace product assembly operation training has been implemented, realizing both on-site AR guidance and automatic operation recording, which improves the efficiency and accuracy of manual operation tasks.

Keywords: Augmented reality; Machine vision; Situation awareness; Manual assembly; Assembly guidance

(责编 逸飞)