

## 增强现实辅助装配技术综述

魏巍<sup>1,2</sup>, 冯蓬勃<sup>3</sup>, 陈峥廷<sup>2</sup>, 迟昭娟<sup>3</sup>

(1.北航歌尔机器人与智能制造研究院, 潍坊 261000; 2.北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 3.北航歌尔(潍坊)智能机器人有限公司, 潍坊 261000)

**摘要:** **目的** 增强现实技术是一种将虚拟信息与真实环境相融合的技术, 增强装配是指将增强现实技术应用到装配领域, 旨在提高装配效率与质量、降低装配培训成本。**方法** 对增强现实辅助装配技术进行了介绍, 并对增强现实三大关键技术(跟踪配准技术、实时交互技术、虚实融合技术)及其在辅助装配系统中的实现方法进行了详细阐述, 然后分类介绍了增强现实辅助装配实例, 最后提出了在实际应用中面临的问题。**结论** 增强现实技术在辅助装配时充分发挥作用的前提是必须要有完善的装配信息模型; 目前受硬件的限制, 头戴式显示器只能在便携性与图形性能之间取一个平衡; 增强装配引导系统的最终使用对象是工人, 因此构建一个用户友好型增强装配系统十分重要。

**关键词:** 增强现实; 辅助装配; 跟踪配准

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)14-0108-11

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.14.012

## Survey of Augmented Reality Assisted Assembly Technology

WEI Wei<sup>1,2</sup>, FENG Peng-bo<sup>3</sup>, CHEN Zheng-ting<sup>2</sup>, CHI Zhao-juan<sup>3</sup>

(1.Beihang Geer Robot and Intelligent Manufacturing Institute, Weifang 261000, China;

2.School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

3.Beihang Geer (Weifang) Intelligent Robot Co., Ltd, Weifang 261000, China)

**ABSTRACT:** Augmented reality is a technology that integrates virtual information with the real environment. Augmented assembly refers to the application of augmented reality technology to the assembly field, aiming to improve assembly efficiency and quality and reduce assembly training costs. This paper introduces the augmented reality assisted assembly technology. Three key technologies involved in augmented reality are described in detail, including tracking and registration technology, real-time interaction technology, virtual and real integration technology. And the implementation methods of technologies in the augmented assembly system are introduced. Then the examples of augmented reality assisted assembly are introduced, and finally the current problems in practical application are discussed. The premise of making full use of augmented reality technology is to have a perfect assembly information model. Currently, due to hardware limitations, head-mounted displays can only take a balance between portability and graphics performance. The final object of augmented assembly guidance system is workers, so it is very important to build a user-friendly augmented assembly system.

**KEY WORDS:** augmented reality; assisted assembly; tracking-registration

增强现实 (Augmented Reality, 简称 AR) 技术 并力求达到时间、空间、光照等方面的一致, 最后通过显示设备进行显示的技术<sup>[1]</sup>。增强现实最大的特点是一种将计算机生成的虚拟信息叠加在真实环境中,

**收稿日期:** 2021-05-25

**作者简介:** 魏巍 (1982—), 男, 辽宁人, 博士, 北航歌尔机器人与智能制造研究院特聘研究员, 北京航空航天大学博士生导师, 主要研究方向为产品开发工程、模块化与配置设计、智能制造、产品全生命周期管理、虚拟现实与增强现实、机器视觉等领域的技术与应用。

在于虚实的实时真实融合,既能利用额外的虚拟信息对现实进行“增强”,又不至于像虚拟现实一样将现实完全取代,进而带来潜在的安全隐患。随着我国制造业智能化进程的推进,增强现实技术在制造业中的应用前景广阔,在工业设计、制造装配、装配检验、设备维修、员工培训等环节都有较好的应用实践。

装配领域是增强现实技术的一个重要的应用领域<sup>[2]</sup>。在制造企业的生产活动中,装配是一个重要且占用大量时间的环节。装配过程中面临着诸如装配步骤繁多、装配过程需要经验技巧、装配零件相似度高问题,这对操作工人提出了极高的要求。增强装配 (Augmented Assembly, 简称 AA) 是指利用增强现实技术辅助装配过程,通过在真实装配环境中叠加合适的虚拟信息,如三维模型、文本、动画等,为操作者在装配过程中提供帮助信息,旨在提升装配效率、提高装配质量、降低装配培训成本。增强现实技术辅助的装配系统能够给工人提供一个虚实相辅相成的装配环境,使工人能够及时获取装配操作过程中所需的信息,如当前操作步骤、所需装配的零件、装配技巧与注意事项、是否装配正确等,与传统的装配指导手册相比,辅助装配系统能够减轻操作人员的认知负担和记忆负担,从而显著提高装配效率、减少装配错误。

本文首先介绍增强现实辅助装配技术,然后介绍增强现实三大关键技术及其在辅助装配系统中的实现方法,再对一些增强现实辅助装配实例进行分类介绍。

## 1 增强现实辅助装配

增强现实技术发展史上的一个重大里程碑是第一台头戴式 AR 设备的发明。20 世纪 60 年代,计算机图形学领域的先驱 Ivan Sutherland 发明了被称为“终极显示器”的头戴式 AR 设备。尽管早期的发明属于 AR 的范畴,但实际上直到 90 年代,波音公司研发人员才首次在论文中提出了“Augmented Reality”这个术语<sup>[3]</sup>,并首次用增强现实技术辅助飞机舱体中线束的安装。随着计算机硬件的发展和相关软件技术的进步,增强现实系统的研究开发成本也急剧下降,从而带来了新一轮的增强现实研究热潮。1997 年,日本索尼计算机科学实验室的 Rekimoto J<sup>[4]</sup>设计了一种彩色条形码,并将其作为标记触发虚拟物体的显示物,以其确定虚拟物体在真实场景中的位置,由此开发了全球首个基于人工标识的掌上增强现实原型系统 NaviCam。同年,哥伦比亚大学的 Feiner S<sup>[5]</sup>设计了游览机器 (Touring Machine),实现了全球首个基于透视头戴式显示器的户外移动增强现实原型系统。1999 年,Hirokazu K<sup>[6]</sup>开发了第一个 AR 开源框架 ARToolKit。得益于该开源框架,AR 技术不再局限于专业的研究机构中,开发门槛大大降低,非专业人员也可以在 ARToolKit 框架下轻松开发自己的 AR 应用。增强现实技术可以利用硬件设备,如移动式设备、



图 1 各 AR 应用的使用效果  
Fig.1 The effect of augmented reality applications

可穿戴式设备等实时采集真实的视频帧图像,并将采集到的视频帧图像在处理器中进行处理、匹配,得到虚拟场景融合的位置,最后将虚拟的模型叠加到该位置,此时用户通过硬件端观察到的即为虚实融合后的场景。同时用户还可以通过人机交互对虚拟的场景进行调整,最终实现人一设备一环境间的协调统一。

在商业应用方面,2015 年任天堂公司推出的 AR 游戏“Pokémon GO”红极一时,玩家捕捉现实世界中出现的宠物小精灵,实现了增强现实技术与游戏的结合。阿里巴巴旗下的支付宝在 2016 年春节推出了 AR 扫福抢红包活动,让大众体验到了 AR 带来的乐趣。同年百度地图上线了“AR 导航”功能,将 AR 技术运用到了步行导航中,在真实的道路上叠加虚拟的指引,方便用户在复杂的路口快速判断方向。2017 年宜家推出了“IKEA Place”这款 AR 手机应用,将虚拟且与真实大小一致的家具与室内环境融合,使用户可以直观地感受到家具在家中放置的效果,足不出户就可以完成家具的选购。各 AR 应用的使用效果见图 1。

2020 年在新型冠状病毒肺炎疫情的背景下,借助于国内知名 AR 服务提供商亮风台的 AR 眼镜 HiAR G200,湖南华菱湘钢实现了我国钢铁业首次通过 5G + AR 进行的跨国远程装配工作,国外工程师依托 AR 的实时标注、桌面共享等技术,远程配合了湘钢现场工程师的产线装配工作。其实增强现实技术在装配领域的应用由来已久。装配是产品生命周期中至关重要的一部分,装配时间和装配质量直接影响产品开发的成本和性能。基于虚拟现实的装配系统需要建立复杂装配环境的模型,耗时费力且无法观察真实环境对操作人员的安全所构成的潜在威胁,而增强现实虚实融合的特点使其更适合应用于装配领域。增强现实辅助装配是指利用增强现实技术对装配过程中需要的模型、文本、操作步骤等信息进行可视化处理,从而增强操作者对装配过程的理解,辅助操作者进行装配作业<sup>[7]</sup>。当前,操作人员还没有从繁重的过程理解和记忆中解脱出来,在实际的装配过程中,仍然无

法摆脱对经验的依赖,技术人员需要凭借长期积累的宝贵经验,才能够快速准确地完成装配工作。利用增强现实技术,将帮助信息直接附加到装配对象上,借助这些辅助信息,无经验的操作者也可以像熟练的技术人员一样完成装配。近年来一个较为成熟的应用是波音公司在飞机线缆手工装配生产线中采用的名为“Skylight”的增强现实装配指导平台,该平台部署在一个轻量化的头戴式眼镜上,佩戴该眼镜的操作人员可以通过语音与系统进行交互,语音输入线缆的编号,眼镜上就会显示出虚拟的连接器图形及正确的孔位。通过该系统的数字化指令和虚拟的帮助信息,操作者能更轻松地完成繁琐复杂的线缆装配工作,提高装配效率和准确率。

1997年 Azuma R T<sup>[8]</sup>发表了一篇关于增强现实的综述,通过探寻增强现实技术的本质,首创性地将增强现实定义为具有以下3个特征的技术:三维配准(Registered in 3D)、实时交互(Interactive in Real Time)、融合真实和虚拟(Combines Real and Virtual)。虽然如今对增强现实技术的研究有了许多突破,增强现实系统的重难点也发生了变化,但是这三个要素依然是系统中不可或缺的关键技术。接下来将对这3个关键技术及其在增强装配系统中的具体实现方法进行介绍。

## 2 跟踪配准技术

与虚拟现实用户完全“沉浸”在由计算机产生的虚拟环境中不同,增强现实既有虚拟物体又有真实的环境,将虚拟信息叠加在真实环境中,即便是很小的配准误差都会被轻易察觉。对于增强现实系统来说,如何使虚拟物体融入真实环境中达到“真假难辨”的效果是其核心问题,而跟踪配准技术是解决这一问题的关键。跟踪配准亦被译为“跟踪注册”。利用机器视觉技术或传感器的信息,建立虚拟空间坐标系与真实空间坐标系的转换关系,使得虚拟信息能够正确地渲染在真实世界中,此过程为配准。在配准完成后,发生相对运动时,基于机器视觉或传感器,实时检测用户的视场与视点,确定当前视场中的目标物,快速重建坐标系进而改变所生成的虚拟物体的位姿,以适应新的场景,此过程为跟踪<sup>[9]</sup>。跟踪配准技术可以分为3种:基于计算机视觉的跟踪配准技术、基于硬件设备的跟踪配准技术、混合跟踪配准技术<sup>[10]</sup>。

基于计算机视觉的跟踪配准技术主要分为基于标志物的方法和基于自然特征的方法。前者主要通过需要在需要生成虚拟信息的位置放置二维码等标志物,标志物主要有两种功能,即既能够提供虚拟物体的位置坐标,又能根据不同的标志物生成不同的场景信息。通过对实时拍摄到的图像进行二值化处理、边缘检测等,能够根据识别出的标志物的位姿信息建立虚拟空间与真实空间的坐标映射关系。目前大部分标识物都

是黑白形式的图片,这种图片识别效率较高,可以很快被计算机从真实环境中提取并检测出来。然而,人工标识物需要事先制作并放入真实场景中,并在使用时将摄像头实时对准标识物。这种做法影响了场景的真实性,降低了用户使用体验,无法有效指导装配过程。后者在实现过程中无需借助标志物,就可直接识别真实环境,利用特征提取算法获得真实环境中的自然特征点并与模板进行匹配,继而计算出虚拟空间与真实空间的坐标映射关系,最后将虚拟物体按照正确的空间透视关系叠加到真实场景中<sup>[11]</sup>。该技术需要事先从不同的角度多方位采集真实场景的图像信息,然后得到较为丰富的特征点信息,在运行时通过摄像机采集真实场景的图像,并通过特征点间的匹配确定虚拟场景叠加的位置和虚拟场景的相应场景信息,最终完成跟踪配准。这种方式的参照物是真实场景中的一些自然的特征,如真实环境中的角点、直线或曲线,无需特别制作与安排标识物,因此场景的真实性较高,用户的使用体验较好。基于硬件设备的跟踪配准技术主要通过各种传感器跟踪相机姿态,主要包括机械跟踪器、光学跟踪器、超声波跟踪器、电磁跟踪器、全球定位系统(GPS)、数字罗盘及惯性跟踪器等。例如可以通过电磁场中感应线圈中的电流强弱判断距离,并将实时位置返回显示输出设备,从而实现跟踪注册过程。混合跟踪技术<sup>[12]</sup>结合了视觉跟踪技术和硬件跟踪技术的优势,通过融合不同类型跟踪器的测量数据获得高精度鲁棒的相机姿态,让虚拟对象在真实环境中实现更精确的定位和配准。先通过硬件检测实时位置,然后将该位置通过计算机视觉算法校准,从而得到更加精确的定位。这种方法既避免了计算机视觉方法跟踪范围较小且当存在遮挡物时无法有效注册的问题,又解决了硬件传感器受环境影响较大,易发生抖动等问题,在室外场景具有较大优势。然而由于其需要将两部分信息相结合,系统开发难度较高,其配套的硬件成本也相对较高,所以目前使用相对较少。

跟踪配准问题是构建增强装配系统时必须考虑的问题,它决定了所要显示的装配引导信息在真实装配环境中的位姿信息。如果没有正确的跟踪与配准,就无法在正确的时间和空间显示虚拟的辅助信息,反而会对操作者产生干扰。基于计算机视觉的跟踪配准技术在增强装配系统中应用最广,实用效果也最好。其中基于人工标志物的跟踪配准技术较为成熟,但也存在如标志物易遮挡场景、在小型零件上难以布置、标志物不在视野范围内时装配引导信息丢失等问题。基于自然特征的跟踪配准技术实现起来较为复杂,但是无需额外布置标志物。

### 2.1 基于自然特征的跟踪配准

为了实现增强装配系统,大量研究者对图像特征提取及跟踪算法进行了研究。基于自然特征的跟踪配

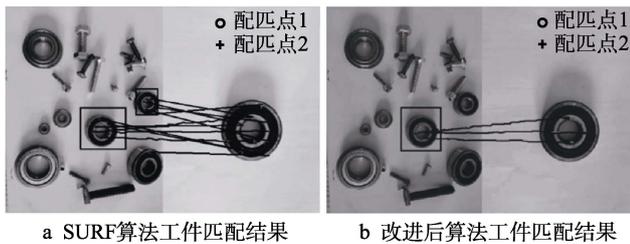


图 2 改进前后匹配效果对比

Fig.2 Comparison of matching effect before and after improvement

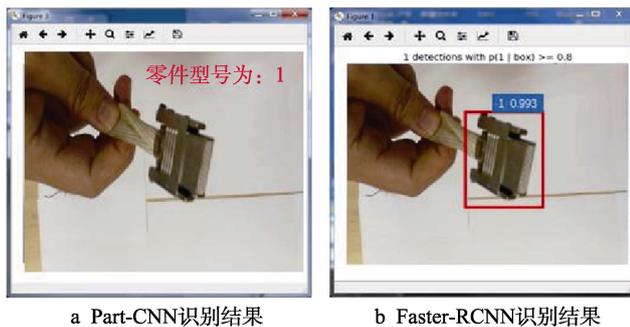


图 3 利用深度学习方法进行目标检测和识别

Fig.3 Target detection and recognition based on deep learning

准，一般是利用特征提取算法提取与描述特征点，常用的算法有 SIFT、SURF、FAST、ORB、BRIEF<sup>[13]</sup>。席剑辉<sup>[14]</sup>针对 SURF 算法容易出现误匹配等情况，提出了一种基于 SURF 算法的改进算法，并用于工件的识别。该方法首先利用 SURF 算法中 Hessian 矩阵检测特征点，然后在特征匹配时利用欧氏距离进行双向匹配，最后利用改进 RANSAC 算法估计特征点对的数学模型，找到符合数学模型的“内点”，从而提高特征匹配的精度，改进前后匹配效果对比见图 2。范利君<sup>[15]</sup>引入了单应性矩阵来恢复多幅图像间的对应关系，改进了在标识被部分遮挡情况下的三维注册矩阵求解问题，同时将 Hessian 矩阵的光流匹配算法应用在注册技术的标识识别部分，使注册的稳定性得到了提高。Radkowski R<sup>[16]</sup>提出了基于自然特征的刚性物体追踪方法和特征映射优化策略。首先采用概率搜索方法对 SIFT 特征匹配算法进行了改进，估计一组给定的特征属于特定电路板的可能性，再对创建的特征图结构进行了优化，最后用多个电路板对该方法进行了验证，结果表明优化后的描述符匹配算法在特征点数量增加的情况下具有较高的正确匹配率。张吴鹏等人<sup>[17]</sup>针对增强现实装配引导系统中弱纹理零件的跟踪配准问题，离线阶段在不同距离、不同角度得到一系列虚拟零件图像，在线阶段根据最优相机位姿搜索算法确定相机位姿，借助距离图像计算该相机位姿对应的虚拟零件图像与实时图像的匹配度，最后系统输出最优相机位姿，实现了配准和虚拟模型的生成。

## 2.2 其他跟踪配准方法

近年来同步定位与建图 (Simultaneous Localization And Mapping, 简称 SLAM) 技术、基于点云的跟踪方法和深度学习方法也被广泛应用于增强现实中。SLAM 是一种主动场景重建的跟踪配准算法，通过摄像头扫描工作环境及传感器数据，继而推断出摄像机运动和周围环境，重建场景的三维模型。通过将当前帧图像的特征点与全局特征点云进行匹配，实时跟踪相机姿态，实时建立三维模型与真实场景空间的姿态关系。Liu J 等人<sup>[18]</sup>提出了一种基于 SLAM 的无标记移动跟踪配准算法，以解决增强现实中由相机快速运动引起的虚拟图像漂移的问题，将传统 SLAM 算法与惯性测量单元数据相结合，构建场景图并定位相机姿势。周建益<sup>[19]</sup>设计了一种深度信息稠密化算法和一种快速平面识别检测算法，解决了 SLAM 算法导致的三维深度信息过于稀疏的问题。基于点云的跟踪通常是基于迭代最近点 (Iterative Closest Point, 简称 ICP) 算法的变体，Wang Y 等人<sup>[20]</sup>提出了一种点云与视觉特征相结合的跟踪方法。使用参考模型点云定义跟踪基准坐标系，确定虚拟装配引导信息的位置。同时为了在无纹理装配中获得足够的视觉特征匹配点，提出了一种新型 ORB 特征匹配策略。最后通过实验证明了该方法在缺乏视觉特征和深度特征的装配环境中具有良好的鲁棒稳定性和跟踪精度。深度学习在目标检测、目标识别方面有很强的优势，是一种很有前景的解决方案，可以提高基于视觉的跟踪配准的精确度及鲁棒性。深度学习技术在增强现实中的应用潜力从其在图像处理上的成功中可见一斑<sup>[21]</sup>。用于目标检测的深度学习算法根据检测流程的不同可以分为两大类，一类是把整个检测过程分为两步来实现，先生成候选框，再识别框内物体，如 Faster-RCNN、Mask R-CNN 等算法；另一类是整个检测流程一步到位，直接给出检测结果，如 SSD、YOLO 等算法。汪嘉杰等人<sup>[22]</sup>在对航天电连接器进行分类识别的任务中采用了 Faster-RCNN 网络结构，不仅输出了航天电连接器型号，而且实现了电连接器所在区域的框选，利用深度学习方法进行目标检测和识别见图 3。舒斌<sup>[23]</sup>在增强现实辅助天线板布线的应用中使用了 Mask R-CNN 网络，用于提取天线板的边缘直线，实现了天线板的位姿跟踪，为后续的布线提供了依据。

## 3 实时交互技术

与传统的人机交互有所不同，增强现实中的人机交互不仅是用户与增强现实设备间的交互，而且要有用户与增强现实场景中的虚拟对象间的交互。用户操纵设备或直接控制场景中的数字化虚拟信息，是一种用户与叠加在现实场景中的虚拟信息进行实时交互的手段<sup>[24]</sup>。

人自身具有多种感官,可以将视觉、触觉、听觉等共同作为输入,实现多感官、多通道的增强现实交互。一种自然的交互方式能为增强现实中的虚拟元素增加真实感,完善虚实融合的效果<sup>[25]</sup>,因此在增强现实中,自然、友好的交互方式十分重要。用户希望像对待真实物体一样直接接触虚拟物体,可以拿起、放下、拉伸、旋转,甚至感觉到虚拟物体的质量等。传统的人机交互手段并不能很好地满足增强现实环境下人机交互的需求,而日益成熟的人体姿态识别、手势识别、语音识别等全新的交互技术有助于实现更自然的人机交互。从传统的键盘、鼠标到语音手势交互,交互方式在便捷性、实时性、沉浸感上实现了质的飞跃。增强现实辅助装配系统的交互性直接影响用户的体验,研究者将语音识别、手势识别等技术与增强现实技术相结合,设计了一系列能够自然交互的增强装配系统。

语音识别技术是近年来新兴的一种人机交互手段,并被认为是目前最友好的交互手段之一。与其他交互方式相比,语音识别技术可以最大程度上解放双手,并且无需深入培训即可使用,是一种十分自然、便利的人机交互方式,适用于移动式设备、可穿戴式设备等。语音交互的主要原理是对使用者所发出的声音进行捕捉、分析及处理,与数据库中相关语义进行比对,得到用户命令的具体内容和其中的语义信息,从而实现相关操作。该技术的核心在于语音识别,即解读音频信号,并将其转化为相应的命令。语音识别方式的系统框架主要包括声学特征提取、声学模型建立和语言模型与语言处理等三个方面。声学特征提取主要是在采样得到相关数据后,要提取出合适的声学特征参数供后续的声学模型训练与使用。声学模型的建立一般采取隐马尔科夫模型进行,这种模型适用于人类发出的声音,可以不断对其进行统计和建模,使用效果较好。语言模型与语言处理包括由识别语音命令构成的语法网络或由统计方法构成的语言模型,语言处理可以进行语法、语义分析。常用的语音识别方法包括基于语言学和声学的方法、随机模型法、神经网络方法及概率语法分析法等。Tseng J L<sup>[26]</sup>利用谷歌云语音(Google Cloud Speech)应用程序接口,在增强现实系统中引入了语音识别机制,开发了语音输入接口、语音分析和语音响应三个模块进行语音交互控制,允许用户通过语音操作3D对象。

手势识别技术主要通过用户手部动作的不同实现不同的交互效果,该技术比较贴近实际使用场景,学习难度较低,交互效果较好,因此在多个领域得到了广泛的应用。针对所用硬件设备的不同,手势识别技术也有不同的表现形式。针对普通计算机的显示器,通常使用数据手套等交互设备捕捉用户手势信息,获取手指、手掌的位置信息和手部轮廓,再根据这些信息直接判断出手部姿势,然后解析语义信息并

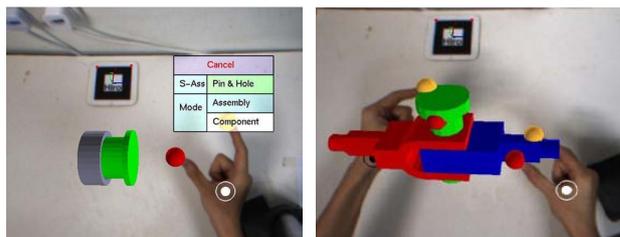


图4 徒手控制虚拟物体  
Fig.4 Control virtual objects with bare hands

输入计算机主机完成显示;针对头戴式设备,通常通过其自带的视频采集器采集手部姿态,提取并处理后与标准库中的样本进行对比,从而确定当前手势中包含的语义信息,实现交互过程。针对移动式设备,通常使用基于触摸屏的手势识别技术,通过识别手指与触摸屏间接触的位置、接触点的数量和手指移动的方向确定具体手势,并在后台根据输入的不同手势确定输入的语义信息。手势交互中不需要佩戴数据手套的徒手交互,因其自然便利的特点,成为了增强装配交互方式中研究的热点。孙超<sup>[27]</sup>提出了一套区域检测跟踪、特征点提取和三维稀疏结构重建算法,能够对不佩戴任何标记的人手找出指尖、指向和手掌平面等所在的位置,从而实现空间一致的操作型手势自然交互。赵守伟<sup>[28]</sup>利用肤色检测算法实现了手势的分割,利用支持向量机进行了手势识别,最后结合具体维修活动开发了 ARSAM 原型系统。新加坡国立大学的 Ong S K 对通过徒手操作虚拟零件进行装配模拟做了大量的研究<sup>[29-30]</sup>,开发了一个基于装配约束分析且能够预测用户手工装配意图的交互式手工装配系统。该系统利用立体视觉技术,可以检索到指尖的三维信息,对每一帧计算 AR 环境中虚拟物体的变换矩阵。当定位在指尖上的两个虚拟球体都与虚拟对象接触时,用户可以操作虚拟对象,当一个或两个虚拟球体不接触时取消选择,用户无需佩戴任何设备即可直接使用自然手势进行虚拟零件和真实零件之间的装配,徒手控制虚拟物体见图4<sup>[30]</sup>。Du G 等人<sup>[31]</sup>研究了将语音和手势同时用于引导机器人运动的方法。将手势文本和语音文本融合转化为矢量,利用词频逆文本频率(Term Frequency-Inverse Document Frequency,简称 TF-IDF)算法提取其特征,采用最大熵模型作为分类器,将手势和语音分类为相应的指令。Liang J 等人<sup>[32]</sup>对手与虚拟对象之间的遮挡问题进行了研究,提出了一种基于手部分割和手部网格生成的裸手深度感知方法,正确的遮挡结果使增强装配系统更具真实感并改善了交互体验。

## 4 虚实融合技术

增强现实与虚拟现实最大的不同在于其致力于实现一个虚实融合的场景。虚实融合是指将数字化的虚拟信息在真实物理场景中合理部署,解决虚拟物体

和真实物体在光照一致性、时间一致性、空间一致性上的问题，力求实现“以假乱真，真假难辨”的效果。对计算机生成的虚拟内容进行管理、实时数据处理、显示器对图形的渲染等技术，实现了增强现实内容在场景中快速准确且逼真的呈现，决定了增强现实应用的展示效果<sup>[33]</sup>。

虚实融合技术包括虚拟模型的生成和虚拟模型在真实场景中的融合。模型的生成主要通过相关软件建模；虚拟模型在真实场景中的融合主要通过特定的软硬件对模型信息进行处理与显示。显示输出的软件部分主要依靠相关的图像生成包，如使用 OpenGL 软件包，或直接使用 Unity3D 等开发工具，将已经开发好的模型转为相应格式并放置到指定位置。显示输出的硬件部分主要包括计算机的普通显示器、头戴式设备及移动式设备。其中头戴式设备又可分为光学透视式和视频显示式，头戴式设备用户浸入感最好，但实现成本较高，主要技术挑战包括系统延迟、分辨率低、场景失真等。

在增强装配系统中，因为头戴式显示器解放了双手便于装配操作的进行，所以是主流的输出设备。然而移动式设备，如手机、平板电脑等所具有的成本低、普及性高且便携的特点使其也成为了增强装配系统非常有前景的平台。如 Marino E 等人<sup>[34]</sup>将平板电脑作为输出工具，协助工人进行工业产品的检验活动。除了模型的生成和显示输出硬件设备的选择等问题，在增强装配系统中要想实现虚实融合，还需要考虑装配信息建模和虚拟信息自动推送的问题。装配信息建模是指对虚拟信息进行组织管理，为虚实融合提供合

适的虚拟信息。虚拟信息自动推送是指在合适的时间将虚拟信息生成。

#### 4.1 装配信息建模

装配信息建模的目的是对多源异构的原始装配数据进行有效的组织与管理，包括数据源的获取，数据清洗、分类、转换及存储等，这对于复杂装配过程来说尤为重要。只有对各方提供的装配数据进行了合理规范的组织，才能为装配信息的显示和零件装配状态的检测提供必要的的数据准备与支持，才能规范地为用户提供合理的引导信息。计算机辅助设计（Computer Aided Design，简称 CAD）、计算机辅助工艺规划（Computer Aided Process Planning，简称 CAPP）等系统打破了传统设计数据、工艺数据传输的方式，保证了数据传输的完整性和可靠性，但是为了将设计信息应用于装配领域，信息的交互性、可读性和指导性还有待提高。

各研究者针对装配作业具体情况的不同，采用了不同的信息组织与建模的方法。李旺等人<sup>[35]</sup>从装配作业常用工艺出发对其进行了分类归纳，对基本装配工艺信息建立了模型，并对工艺步骤信息的编辑和管理方法进行了研究，开发了原型系统并进行了验证。刘然<sup>[36]</sup>将面向零件跟踪引导的产品装配信息模型分为了 3 个部分，实现了产品装配过程中相应装配引导信息的检索，提供了零件类型信息、装配操作时长等信息，并为三维位姿估计提供了匹配模板，面向零件跟踪引导的产品装配信息模型见图 5。唐健钧等人<sup>[37]</sup>针对飞机装配过程不连续的问题，利用 XML 格式的

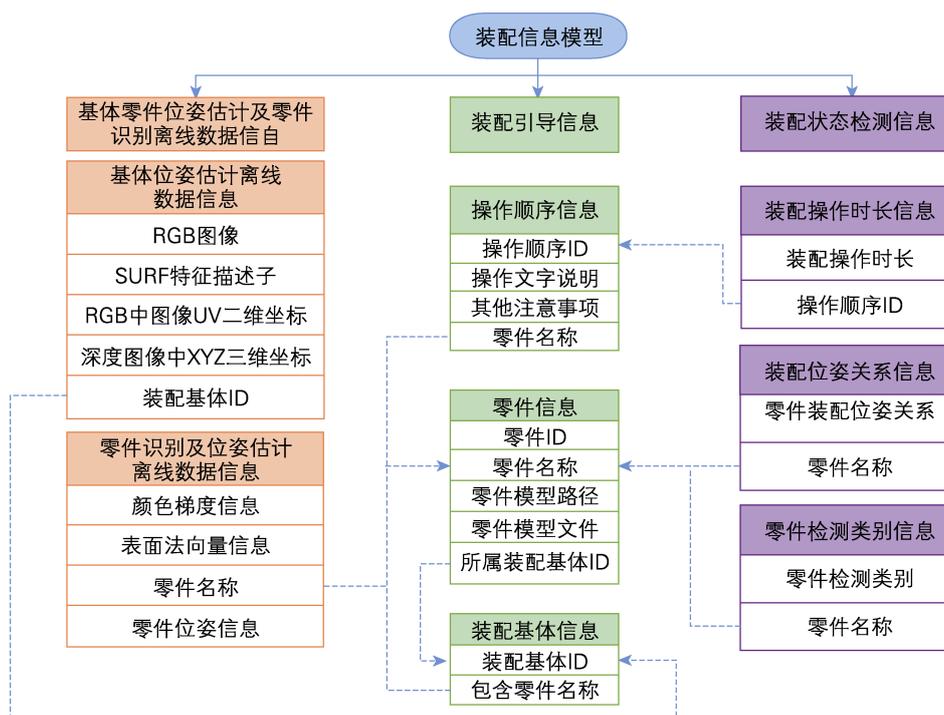


图 5 面向零件跟踪引导的产品装配信息模型

Fig.5 Product assembly information model for part tracking guidance

动态 AR 装配指令,描述了装配作业操作、操作对应的场景和该场景所需要的引导资源,并将作业之间的顺序、场景的识别要求及资源的加载方式等也进行了结构化描述。杨康康<sup>[38]</sup>在复杂产品辅助装配系统中分析了信息组织管理的需求,提出了一个面向操作引导的多源装配信息模型。从引导信息来源、存储和获取3个方面对其进行了详细介绍和剖析,实现了一个从原始的 CAD 系统、工艺系统等数据源到数据库,再从数据库到装配引导系统的快速方便的信息自动生成方案。Saaski J<sup>[39]</sup>为了实现增强装配虚拟引导信息的自动化创建,提出将设计系统与装配设计软件工具相集成,利用标准 STEP 格式文件作为输出,利用 DFA-Tool 组装性分析软件进行可装配性分析,最后生成 AR 设备中显示的增强装配引导信息。

#### 4.2 虚拟信息自动推送

尽管增强装配系统可提供多种类型的帮助信息,辅助操作人员进行装配作业,但是虚拟信息的显示仍然需要操作者主动发出指令才能触发,如点按鼠标、虚拟菜单或比划特定的手势。操作者需要进行额外的指令学习,这导致学习成本、记忆负担的增加。操作人员在作业过程中与系统频繁交互,不仅会降低其专注度,影响装配操作的连贯性,而且有可能使其手忙脚乱,反而有降低作业效率和装配准确率的可能性。如果研究人员能纪录和合理组织真实操作步骤及其对应的辅助信息,那么就能达到虚拟辅助装配信息及时精准主动推送的目的,从而使辅助装配系统完成辅助于无形。

Bleser G 等人<sup>[40]</sup>对构建一个成功的辅助系统所需要的三项关键技术(用户指导和反馈、 workflow 恢复和分析、状态感知)进行了研究。利用视觉传感器和可穿戴惯性测量单元,对有经验的操作者手部位置和操作物体位置进行了估计,利用有监督学习的方法,对采集的数据进行了训练,得到了一个能够识别操作序列的模型。在无经验者进行操作时,用该模型实时识别并预测操作序列,在头戴式显示器中为操作者提供增强现实操作引导信息。Petersn N 等人<sup>[41]</sup>引入了认知增强现实的概念,实现了一个能够感知和跟踪工作流程的系统。在运行时,将用户头戴摄像机的实时视频图像与记录的参考工作流程进行相似度判断,识别当前执行的操作,以便在眼镜中显示带有透明度的相应维修操作的引导视频。尹旭悦等人<sup>[42]</sup>提出并实现了一种增强装配引导训练原型系统,该系统能够根据装配现场操作进行自主决策,增强装配引导原型系统见图6。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,再根据操作进行的状态自动控制输出相应的装配工艺引导信息,并在工序中加入检验点,然后保存检验点的图像,最终提高装配质量的可溯性。刘然<sup>[36]</sup>在预先进行装配信息建模的基础上,



图6 增强装配引导原型系统

Fig.6 Augmented assembly guidance system prototype

在装配时实时识别零件,利用装配信息模型进行相关信息的预加载。结合装配操作时长信息、零件检测类别信息及装配位姿关系信息,当系统检测到装配超时或零件装配位姿不符时,辅助装配引导系统会主动进行信息推送引导装配。

### 5 增强现实辅助装配实例

增强现实技术具有非常高的实用价值和商业价值,近年来成为科技公司重点研发的方向。2012年谷歌公司发布了一款增强现实专用设备——谷歌眼镜<sup>[43]</sup>,这种头戴式显示设备能将智能手机的信息投射到用户眼前,为佩戴者提供一系列的增强现实功能和应用。随后,微软公司于2015年推出了HoloLens眼镜<sup>[44]</sup>,利用双目视差原理,在眼镜左右眼处显示虚拟物体不同角度的图像,实现物体的三维立体渲染。Magic Leap公司于2018年推出了Magic Leap One眼镜,该设备提供了更多的娱乐性应用。2017年苹果公司发布了旗下的增强现实平台ARKit,2018年谷歌公司发布了增强现实平台ARCore,对增强现实应用的底层算法进行了封装。类似的还有高通公司旗下的Vuforia,它打破了对设备的限制,支持安卓、iOS、Unity等平台,推出至今备受青睐。

增强现实技术在工业装配领域已有了较多的应用,可以解决装配过程中不同阶段的问题,还可以重复使用和再现设计信息和知识,进而帮助缩小产品设计和制造之间的差距。根据增强现实技术在辅助装配时扮演的角色不同,可以分为增强装配引导、增强装配训练、增强装配仿真、增强装配设计、增强装配质量检测等。

通过对相关文献进行归纳总结,可以发现增强现实技术目前主要应用于装配引导和装配状态检测。Makris S 等人<sup>[45]</sup>提出了一种装配序列自动生成算法,并利用语义数据进行了零部件的分类,以便在为特定任务构建虚拟指令时,软件能够识别它们的功能。随



图 7 增强现实辅助装配检测  
Fig.7 AR assisted assembly detection



图 8 增强现实辅助装配引导  
Fig.8 AR assisted assembly guidance

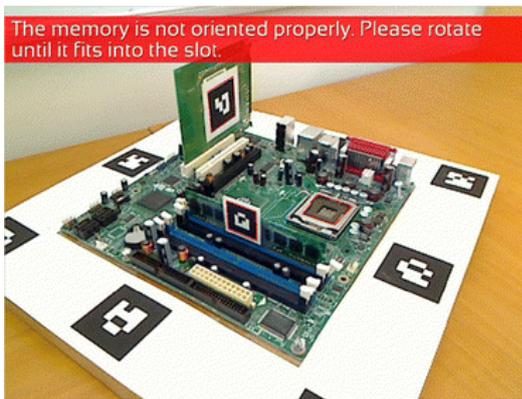


图 9 装配错误警告信息  
Fig.9 Assembly error warning message

后将自动生成的装配序列信息与系统的 AR 模块结合, 将增强现实技术作为一种最终的装配指导媒介, 帮助生产工程师和车间操作员分别生成和使用装配指令。Mura M 等人<sup>[46]</sup>实现了一个利用力传感器进行辅助的手工装配引导系统。力传感器和相机能够在装配操作进行过程中实时检测错误, 并通过 AR 显示警告。Francesca F 等人<sup>[47]</sup>以微软 HoloLens 为硬件, 以 Unity 和 Vuforia 为软件, 开发了一个辅助樱桃采摘机液压软管装配的系统。该系统能够进行分步引导、操作反馈和时序反馈, 通过文本、图像和动画提供顺序指令, 并通过实验验证了 AR 辅助装配的有效性。Marino E 等人<sup>[34]</sup>使用谷歌 ARCore 软件开发工具包开发了 AR 工具, 通过将虚拟 3D 模型叠加在相应的物理原型上, 使工人可以很容易地检测到生产和装配错误, 然后直接在虚拟模型上添加 3D 注释, 向上报告并分享这些信息, 增强现实辅助装配检测见图 7。Wang Y 等人<sup>[20]</sup>开发了一个基于平板的无人机发动机辅助装配系统, 见图 8。为了提高系统的运行速度, 装配指导信息被存储在远程服务器上, 系统可以通过

无线网络访问数据。操作人员在访问系统时可以选择不同的装配任务, 还可选择通过动画演示模型或 AR 手动装配指导模型进行辅助。对于一些重要的装配过程, 同时采用动画和文字有利于操作人员理解装配过程。庞列勇等人<sup>[48]</sup>设计了一个基于 Kinect 的投影式增强装配引导系统, Kinect 传感器用于手势和头部位置的检测, 实现了装配过程中的徒手交互, 以及基于视点跟踪的自动变换投影图像。

Wang X 等人<sup>[49]</sup>将增强现实技术用于装配设计, 在产品的早期设计阶段开发了一个 AR 应用程序来模拟装配过程。通过考虑实体部件和虚拟样机的刚度、形状和接触面的问题, 提出了一种计算接触力和相应操纵力的方法, 在装配仿真过程中实时呈现装配力, 以便在产品早期设计过程中发现装配规划和设计方面的问题。

Webel S 等人<sup>[50]</sup>研究了将增强现实用于培训, 设计了一个基于多模式增强现实的维护和装配技能培训平台, 该平台能够自适应地为具有不同经验程度的操作者提供强指引或弱指引, 还加入了振动手环给予额外的动作提示, 如手腕旋转方向等。Westerfield G 等人<sup>[51]</sup>设计了一个名为主板装配导师 (Motherboard Assembly Tutor) 的智能 AR 系统, 利用 3D 图形、动画、音频和文本等信息, 训练用户在计算机主板上组装组件, 内容包括识别单个组件, 安装内存、处理器和散热器。该系统能够提供操作的实时反馈, 通过识别组件的位置和方向判断是否装配正确, 还能够显示警告信息以纠正装配, 见图 9。

## 6 结语

随着增强现实应用开发相关的底层算法被不断集成完善, 计算机、头戴式显示器、移动设备等硬件的各项性能不断提升, 增强现实技术被逐渐成功应用于各个领域。本文介绍了增强现实辅助装配技术当前的应用及研究进展。虽然目前从应用情况来看, 大量企业和研究者应用了该技术, 但是其应用大多处于初步探索阶段, 从原型系统到真正落地还有很长的路要走, 仍旧面临着不少亟待解决的问题。总结起来主要集中在以下 3 个方面。

1) 增强现实技术在辅助装配时充分发挥作用的前提是必须要有完善的装配信息模型。增强装配引导系统依赖于对应的信息模型, 因此往往只针对特定型号的装配产品, 通用性不强, 当有新的定制化生产需求或产品更新换代后则需要开发一个新的系统, 这显著增加了人力和时间成本。当前装配信息模型建立过程高度依赖人工的参与, 数据库的具体定义和构建方式还需要进一步研究确定。日后如果能做到数据库充分收集产品全生命周期积累的各类设计、装配、维修数据信息, 将多源异构的原始数据相互融合, 自动生成适合增强现实系统显示的引导信息, 将对增强装配

系统在大规模定制化生产中的快速应用起到决定性的作用。

2) 目前受硬件的限制, 头戴式显示器只能在便携性与图形性能之间取一个平衡。HoloLens 2 采用了计算单元与显示器一体的形式, 因此只能显示较简单的模型, 在增强装配中的体现就是对大型复杂曲面零部件的渲染会受到限制。Magic Leap One 采用了分体式的设计, 虽然图形性能提升了, 但是额外的计算单元及其与显示单元的有线连接带来了许多不便, 还容易导致用户被绊倒。未来的发展趋势是结合“云服务”中的“云计算”, 并且借助于更强大的无线网络传输能力, 可以将计算与显示相分离。同时, “云服务”中的“云数据库”可以解决大量模型存储在本地设备, 占用设备大量内存, 影响设备处理能力的问题。随着产品不断更新的装配模型数据被上传至云端服务器, 可以在“云数据库”中建立模型与装配辅助信息的对应关系。利用日益成熟的“云技术”解决增强装配系统中所遇到的问题, 符合智能制造的发展要求, 但具体的实现方法也需要进一步研究。

3) 增强装配引导系统的最终使用对象是工人, 因此构建一个用户友好型增强装配系统十分重要。然而目前由于头戴式显示器较重带来了额外负担, 显示的实时性较差容易产生眩晕, 设备价格较高企业难以负担, 用户和系统交互方式还不够自然等问题, 所以增强装配系统还未大范围普及应用。

未来随着研究的不断深入, 增强现实技术会得到进一步发展, 增强现实技术会更好服务于装配, 为智能制造的发展助力。

#### 参考文献:

- [1] PALMARINI R, ERKOYUNCU J A, ROY R, et al. A Systematic Review of Augmented Reality Applications in Maintenance[J]. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2018, 49: 215-228.
- [2] ELEONORA B, GIUSEPPE V. Augmented Reality Technology in the Manufacturing Industry: a Review of the Last Decade[J]. *IIEE Transactions*, 2019, 51(3): 284-310.
- [3] CAUDELL T P, MIZELL D W. Augmented Reality: an Application of Heads-up Display Technology to Manual Manufacturing Processes[J]. *Proceedings of the Twenty-fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, 1992, 2: 659-669.
- [4] REKIMOTO J. Navicam: a Magnifying Glass Approach to Augmented Reality Systems[J]. *Presence Teleoperators & Virtual Environments*, 1997, 6: 123-132.
- [5] EINER S, MACLNTYRE B, HOLLERER T, et al. A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment[J]. *Personal Technologies*, 1997, 1(4): 208-217.
- [6] CARMIGNIANI J, FURHT B, ANISETTI M, et al. Augmented Reality Technologies, Systems and Applications[J]. *Multimed Tools Appl*, 2011, 51: 341-377.
- [7] JIA W, ZHU J, XIE L, et al. Review of the Research on Augmented Reality Maintenance Assistant[M]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 8: 41.
- [8] AZUMA R T. A Survey of Augmented Reality[J]. *Teleoperators and Virtual Environments*, 1997, 6(4): 355-385.
- [9] 康波. 增强现实中的跟踪技术[J]. *计算机测量与控制*, 2006(11): 1431-1434.  
KANG Bo. Review of the Research on Augmented Reality Maintenance Assistant[J]. *Computer Measurement and Control*, 2006(11): 1431-1434.
- [10] 韩玉仁, 李铁军, 杨冬. 增强现实中三维跟踪注册技术概述[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(21): 26-35.  
HAN Yu-ren, LI Tie-jun, YANG Dong. Overview of 3D Tracking Registration Technology in Augmented Reality[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(21): 26-35.
- [11] 胡天宇, 张权福, 沈永捷, 等. 增强现实技术综述[J]. *电脑知识与技术*, 2017, 13(34): 194-196.  
HU Tian-yu, ZHANG Quan-fu, SHEN Yong-jie, et al. An Overview of Augmented Reality[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2017, 13(34): 194-196.
- [12] 罗斌, 王涌天, 沈浩, 等. 增强现实混合跟踪技术综述[J]. *自动化学报*, 2013, 39(8): 1185-1201.  
LUO Bin, WANG Yong-tian, SHEN Hao, et al. Overview of Hybrid Tracking in Augmented Reality[J]. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 2013, 39(8): 1185-1201.
- [13] 侯守明, 韩吉, 张煜东, 等. 基于视觉的增强现实三维注册技术综述[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(11): 2206-2215.  
HOU Shou-ming, HAN Ji, ZHANG Yu-dong, et al. Survey of Vision-Based Augmented Reality 3D Registration Technology[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(11): 2206-2215.
- [14] 席剑辉, 汤丽. 基于 SURF 改进算法的工件识别[J]. *制造技术与机床*, 2020, 701(11): 18-22.  
XI Jian-hui, TANG Li. Workpiece Recognition Based on SURF Improved Algorithms[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tools*, 2020, 701(11): 18-22.
- [15] 范利君, 童小念. 移动增强现实中视觉三维注册方法的实现[J]. *计算机与数字工程*, 2011, 39(12): 138-141.  
FAN Li-jun, TONG Xiao-nian. Realization of Visual Three-dimensional Registration Method in Mobile Augmented Reality[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2011, 39(12): 138-141.
- [16] RADKOWSKI R, OLIVER J H. Natural Feature Tracking Augmented Reality for on-site Assembly Assistance Systems[M]. *International Conference on Virtual*, 2013: 281-290.

- [17] 张昊鹏, 郭宇, 汤鹏洲, 等. 基于图像匹配的增强现实装配系统跟踪注册方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020: 1-18.  
ZHANG Hao-peng, GUO Yu, TANG Peng-zhou, et al. Tracking and Registration Method Based on Image Matching for Augmented Reality Aided Assembly System[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020: 1-18.
- [18] LIU J, XIE Y, GU S, et al. A Slam-based Mobile Augmented Reality Tracking Registration Algorithm[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2020, 34(1): 1-19.
- [19] 周建益. 基于SLAM的无标记增强现实算法研究及其在文物展示中的应用[D]. 西安: 西北大学, 2020.  
ZHOU Jian-yi. Markless Augmented Reality Algorithm Based on SLAM and Its Application in Cultural Relics Display[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [20] WANG Y, ZHANG S, WAN B, et al. Point Cloud and Visual Feature-based Tracking Method for an Augmented Reality-aided Mechanical Assembly System[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(9): 2341-2352.
- [21] CHANDAN S, CRYSTAL Y, RAHUL R. Artificial Intelligence (AI) in Augmented Reality (AR)-assisted Manufacturing Applications: a Review[J]. International Journal of Production Research, 2020: 1-57.
- [22] 汪嘉杰, 王磊, 范秀敏, 等. 基于视觉的航天电连接器的智能识别与装配引导[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(11): 2423-2430.  
WANG Jia-jie, WANG Lei, FAN Xiu-ming, et al. Vision Based Intelligent Recognition and Assembly Guidance of Aerospace Electrical Connectors[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(11): 2423-2430.
- [23] 舒彬. 面向 AR 辅助装配的目标三维跟踪方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.  
SHU Bin. Target 3D Tracking Method for AR Auxiliary Assembly[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [24] 胡庆夕, 刘涛, 姚远. 基于增强现实技术的三维交互建模[J]. 计算机工程, 2010, 36(13): 236-238.  
HU Qing-xi, LIU Tao, YAO Yuan. Three-dimensional Interactive Modeling Based on Augmented Reality Technology[J]. Computer Engineering, 2010, 36(13): 236-238.
- [25] 叶双清, 李丽兰. 增强现实人机交互控制的专利技术综述[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(22): 226.  
YE Shuang-qing, LI Li-lan. A Review of Augmented Reality Human-computer Interaction Control Patents[J]. Technology and Economic Guide, 2019, 27(22): 226.
- [26] TSENG J L. Intelligent Augmented Reality System Based on Speech Recognition[J]. International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, 2021, 15: 178-186.
- [27] 孙超. 增强现实环境下基于手势的自然交互[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
SUN Chao. Gesture Based Natural Interaction in Augmented Reality. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [28] 赵守伟. 增强现实辅助维修关键技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.  
ZHAO Shou-wei. Key Technology Research of Augmented Reality to Assistance Maintenance[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.
- [29] ONG S-K, WANG Z-B. Augmented Assembly Technologies Based on 3D Bare-Hand Interaction[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60: 1-4.
- [30] WANG Z B, ONG S K, NEE A Y C. Augmented Reality Aided Interactive Manual Assembly Design[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69: 1311-1321.
- [31] DU G, ZHANG B, LI C, et al. A Novel Natural Mobile Human-machine Interaction Method with Augmented Reality[J]. IEEE Access, 2019, 7: 154317-154330.
- [32] LIANG J, HE H, WU Y. Bare-hand Depth Perception Used in Augmented Reality Assembly Supporting[J]. IEEE Access, 2020, 8: 1534-1541.
- [33] 王祯. 基于增强现实的船体分段辅助装配系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
WANG Zhen. Hull Assembly System Based on Augmented Reality[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [34] MARINO E, BARBIERI L, COLACINO B, et al. An Augmented Reality Inspection Tool to Support Workers in Industry 4.0 Environments[J]. Computers in Industry, 2021, 127(6): 103412.
- [35] 李旺, 王峻峰, 蓝珊, 等. 增强现实装配工艺信息内容编辑技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7): 1676-1684.  
LI Wang, WANG Jun-feng, LAN Shan, et al. Content Authoring of Augmented Reality Assembly Process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(7): 1676-1684.
- [36] 刘然. AR 辅助装配中基体零件位姿估计与状态检测方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.  
LIU Ran. Pose Estimation and State Detection of Base Part and Assembly Parts for Augmented Reality Aided Assembly[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [37] 唐健钧, 叶波, 耿俊浩. 飞机装配作业 AR 智能引导技术探索与实践[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 22-27.  
TANG Jian-jun, YE Bo, GENG Jun-hao. Exploration and Practice of AR Intelligent Guidance Technology in Aircraft Assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 22-27.

- [38] 杨康康. 面向复杂产品装配的增强现实关键技术研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.  
YANG Kang-kang. Research and Application of Augmented Reality Key Technologies for Complex Product Assembly[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [39] SAASKI J, SAIONEN T, HAKKARAINEN M, et al. Integration of Design and Assembly Using Augmented Reality[J]. IFIP International Federation for Information Processing, 2008, 260: 395-404.
- [40] 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).
- [41] PETERSEN N, STRICKER D. Cognitive Augmented Reality[J]. Computers & Graphics, 2015, 53: 82-91.
- [42] 尹旭悦, 范秀敏, 王磊, 等. 航天产品装配作业增强现实引导训练系统及应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(Z1): 48-53.  
YIN Xu-yue, FAN Xiu-ming, WANG Lei, et al. Augmented Reality Guidance and Training System for Aerospace Product Assembly and Application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(Z1): 48-53.
- [43] MUENSTERER O J, LACHER M, ZOELLER C, et al. Google Glass in Pediatric Surgery: an Exploratory study[J]. International Journal of Surgery, 2014, 12(4): 281-289.
- [44] TEPPER O M, RUDY H L, LEFKOWITZ A, et al. Mixed Reality with HoloLens: Where Virtual Reality Meets Augmented Reality in the Operating Room[J]. Plastic and Reconstructive Surgery, 2017, 140(5): 1066-1070.
- [45] MAKRIS S, PINTZOS G, RENTZOS L, et al. Assembly Support Using AR Technology Based on Automatic Sequence Generation[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(1): 9-12.
- [46] MURA M D, DINI G, FAILLI F. An Integrated Environment Based on Augmented Reality and Sensing Device for Manual Assembly Workstations[J]. Procedia CIRP, 2016, 41: 340-345.
- [47] FERRATI F, ERKOYUNCU J A, COURT S. Developing an Augmented Reality Based Training Demonstrator for Manufacturing Cherry Pickers[J]. Procedia CIRP, 2019, 81: 803-808.
- [48] 庞列勇, 陈成军, 李东年, 等. 基于 Kinect 的投影式增强现实装配诱导系统研究[J]. 机电工程, 2019, 36(2): 136-141.  
PANG Lie-yong, CHEN Cheng-jun, LI Dong-nian, et al. Projected Augmented Reality Based Assembly Guiding System Using Kinect[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(2): 136-141.
- [49] WANG X, ONG S K, NEE A Y C. Real-virtual Components Interaction for Assembly Simulation[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2016, 41: 102-114.
- [50] 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: 398-403.
- [51] WESTERFIELD G, MITROVIC A, BILLINGHURST M. Intelligent Augmented Reality Training for Motherboard Assembly[J]. Int J Artif Intell Educ, 2015, 25: 157-172.