

AR复杂机械装配工艺研究

何泽远 薛皓铭 袁彬展 朱佳豪 董家豪
西安航空职业技术学院 陕西西安 710089

摘要: 本文围绕增强现实技术在复杂机械装配中的应用展开研究,构建了AR智能装配指导系统体系架构,深入分析三维跟踪注册、动态遮挡处理等核心技术,探讨装配序列自动化规划与人机协同认知优化等关键问题。研究表明,AR技术通过虚实融合有效解决复杂装配的核心矛盾,未来与数字孪生、人工智能的深度融合,将成为推动复杂装备制造工艺向高端迈进的关键技术支撑。

关键词: 增强现实; 复杂机械装配; 工艺指导; 人机协同; 三维跟踪注册

一、制造业数字化转型背景与装配工艺的战略地位

在工业4.0与工业5.0并行的技术范式下,全球制造业正经历从追求生产速度向强调柔性、定制化及以人为本的智能化转型。装配工艺作为制造全周期的终端环节,其效率和精度直接决定了产品的最终质量、交付周期及生产成本。统计数据显示,装配环节成本通常占据机械制造总成本的30%至40%^[1],在航空发动机、精密减速机复杂装备制造中,装配周期往往占据整个制造周期的60%以上。随着机械设备集成度的指数级提升,装配任务涉及的零件数量已达百万级,这对现有工艺指导手段提出了严峻挑战^[2]。

传统的装配工艺指导模式高度依赖二维纸质图纸、静态PDF手册或离线工艺文档。操作者必须在物理作业区域与信息获取终端之间频繁切换注意力,形成“视觉碎片化”现象,导致显著的认知负荷,极易诱发因图纸误读、零件辨识错误或工序遗漏产生的操作失误。因此,引入增强现实技术实现虚实融合的动态指导,已成为制造业突破效率瓶颈的关键路径。

二、增强现实技术在装配领域的核心价值

增强现实技术通过在现实场景中叠加计算机生成的虚拟信息,极大地增强了用户对环境的感知与处理能力。在复杂机械装配语境下,AR不仅仅是信息的简单叠加,更是通过对作业场景的实时语义理解,将三维CAD模型、扭矩规格、操作轨迹及质量检测标准以数字化方式精准“锚定”在物理实体之上^[3]。这种高度直观的交互模式有效缩减了工人在信息检索与理解上的耗时,实现了从“人适应信息”向“信息适配人”的跨越。

通过对比实验可以发现,基于AR的装配辅助系统

在减少累积误差方面具有显著优势。此外,AR系统作为一种数字化的防错系统,能够实时监控操作者的进度,并在检测到偏离预设序列时发出警示,这种闭环的工艺控制极大提升了复杂任务的可控性。

三、复杂产品智能装配指导系统体系架构

构建稳定、精准且具备高度可用性的AR装配系统,需要多层级的架构支持,以协同处理海量的图形渲染、高频的空间定位以及实时的传感器反馈。行业共识将该架构分为以下层次:

(一) 物理资源层

包括各类物理设备、传感器、AR终端(如头戴式显示设备)以及待装配的机械零部件。该层负责采集现场实时数据,为上层提供物理世界的数字映射基础。^[4]

(二) 通信连接层

依托5G、工业互联网等高速通信技术,实现物理设备与计算平台之间的低延迟数据传输。5G边缘计算的引入,使得大规模图形渲染任务可在靠近工厂基站的边缘侧完成,有效解决了AR眼镜发热严重、续航不足的问题。

(三) 计算处理层

核心功能包括三维注册与跟踪、虚实融合渲染、装配序列规划等。数字孪生技术的融入使AR系统具备了“预测”与“优化”能力,数字孪生模型不仅包含几何形状信息,还集成了物理属性、工艺约束及实时状态数据。

(四) 交互应用层

面向操作者的人机交互界面,通过视觉、听觉、力觉等多模态反馈,实现装配引导、质量检测与远程协作等功能。

四、关键核心技术

(一) 三维跟踪注册与空间定位

三维跟踪注册是AR系统的技术核心,旨在实时获取摄像机相对于真实环境的位姿,从而将虚拟引导信息准确地投影到指定位置。对于机械装配而言,由于现场环境存在光照剧烈变化、金属表面反光以及操作者遮挡等不利因素,传统的基于人工标识的注册方式已逐渐被无标识跟踪技术取代。

1. 视觉SLAM与环境地图构建

同步定位与建图算法使AR终端能够在未知环境中自主确定位置并构建地图。在工业应用中,优化后的ORB-SLAM算法通过引入多网络时空特征处理,显著提升了在弱纹理零件表面的特征点匹配成功率。利用RGB-D摄像机提供的深度信息,系统能够构建高精度云地图,从而在毫米级精度上支撑虚拟指令的“锚定”。^[5]

2. 复杂机械零件的稳健位姿估计

针对几何特征复杂的工业零件,单纯依靠点云匹配往往难以满足精密装配要求。目前领先的研究采用基于多模态融合的位姿跟踪算法,整合区域、深度和纹理信息,通过求解联合概率密度函数,结合零件的三维CAD模型进行迭代优化,实现了在复杂背景下的鲁棒识别。

(二) 动态遮挡处理与视觉透明化

遮挡处理是实现高度沉浸式装配引导的关键技术门槛。如果虚拟引导箭头的深度位置在逻辑上被操作者的手部遮挡,但在渲染时却显示在手的前方,会造成视觉冲突和深度感知障碍。

1. 基于深度的遮挡解算算法

现代AR系统通常采用LiDAR或RGB-D传感器实时扫描工作区域,通过将物理环境的深度图与虚拟引导模型的Z轴数值进行逐像素对比,动态裁剪虚拟物体的显示区域。结合深度图平滑算法和人体运动预测的方案,可将遮挡准确率显著提升,降低由于视觉伪影导致的操作失误。

2. 视觉盲区与“透视”引导技术

在航空航天及船舶制造中,大量装配点位于设备背面或狭小隔舱内。AR技术通过构建视觉透明化视效,将遮挡物渲染为半透明状态,并以高亮色标注内部的螺栓孔、线缆槽等位置。这种方法赋予操作者“透视眼”,在面对视线受阻的盲插任务时,能够通过AR提供的虚拟引导线快速定位装配位点^[6]。航天科技八院812所研发的“卫星电缆敷设AR可视化指导系统”已实现这一功能,

电缆路径、弯曲半径、接口编号等关键信息一目了然,作业效率大幅提升。

五、装配工艺序列的自动化规划与内容创作

AR引导系统的效能高度依赖于底层装配序列规划的质量。传统的AR内容开发需要工程师手动定义每一步的动画和标注,面对产品设计的快速迭代,这种“手工制作”模式已成为数字化交付的瓶颈。

(一) 基于物理可行性的自动化规划

自动化序列规划研究提出了一种集成重力稳定性、几何碰撞规避和运动学约束的自动化规划模型。该模型能够直接从STEP或OBJ格式的CAD文件中提取拓扑关系,通过高效的树搜索算法生成在物理世界中稳态且逻辑严密的装配序列。清华大学机械系张建富课题组提出的ARAIAG方法,通过多深度相机系统记录工程师的装配演示过程,生成三维点云视频,实现了无代码的AR装配指令创作与生成。

(二) 多维度信息分级展示

针对不同熟练程度的操作者,AR系统引入细节水平管理。研究发现,过多的视觉冗余对专家而言反而是一种心理负担,而针对新手,提供全维度动态反馈能将学习效率提升30%至40%。^[7]

六、人机协同中的认知负荷与人因效能研究

AR技术引入装配现场后,人与机器、人与信息的交互关系发生了根本性变化。如何平衡信息量与人类的处理能力,是AR辅助装配能否大规模推广的核心人因工程问题。

(一) 认知负荷的测量与分析

学术界普遍采用NASA-TLX量表作为主观评估工具,同时结合脑电图、心率变异性以及瞳孔放大率等生理指标量化用户的心理负荷[citation: 17]。研究表明,虽然AR在执行高难度维护任务时能显著缩短操作时间,但有时会由于视觉通道过载而导致受试者的挫败感和心理压力上升。

(二) 多模态反馈机制的降负作用

为减轻视觉通道压力,力觉和听觉反馈被引入装配指导中。在零件即将对接成功的关键时刻,给予操作者微弱的腕部振动或音频提示,其引导精度远高于单纯的视觉箭头。实验证实,通过多模态协调可使认知负荷降低43%,并将程序性技能任务中的错误率减少52%。

七、5G与工业互联网赋能下的协同装配模式

在单机AR模式下,计算能力瓶颈和数据同步滞后

限制了其在大型群体协同场景中的应用。5G网络与边缘计算的深度集成，为AR装配带来了“端-管-云”协同的新范式。

5G网络提供的超100Mbps上行带宽支撑了第一视角高清图像的实时回传。在跨国协作案例中，多地工程师通过5G+AR平台实现了异地同步装配引导，复杂的3D模型渲染任务在靠近工厂基地的边缘侧完成，终端仅负责解码和显示。在遇到突发工艺问题时，AR技术支持远程专家在现场工人视野中进行空间标注，专家绘制的线条或放置的图标精准“附着”在三维零件的特定位置上。这种“看我所看”的沟通模式，将原本需要数小时甚至数天的专家现场出差诊断过程，缩短到10分钟以内^[8]。

八、典型行业应用案例与量化价值分析

AR技术在不同行业展现出了极高的适应性和差异化的价值主张，尤其是在高附加值、长周期的装备制造领域^[9]。

在航空航天领域，北京航空航天大学团队重点攻关航空线缆连接器的智能防错检测，利用AR眼镜集成的机器视觉算法实现连接器状态的实时判定。

九、行业面临的瓶颈与未来趋势

(一) 当前面临的瓶颈

尽管技术前景广阔，但AR装配在迈向全产业链部署过程中仍面临多重障碍。硬件终端方面，现有高端头显在工业现场表现出显著局限性：佩戴重量在长时间作业中会导致颈部疲劳；执行高性能图形运算时易出现过热保护，导致计算降频和画面漂移；光学透视屏幕在工厂强光环境下的对比度不足。内容生成方面，AR装配内容在不同硬件平台间的移植性较差，缺乏统一的工业AR数据交换标准，从PLM系统到AR终端的自动数据流动链条尚未完全打通。

(二) 未来演进趋势

随着生成式AI与大语言模型与AR技术的深度融合，装配指导系统将实现从“预设流程触发”向“意图感知的智能伴随”跨越。未来的AR系统将能够通过语音与操作者进行自然语言互动，根据操作者的即时提问，从工程手册中提取关键知识点，并实时生成对应的三维可视化标注。^[10]

结论

基于AR技术的复杂机械装配工艺指导研究，已从最初的单纯视觉增强阶段步入深度理解场景、闭环控制质量与多模态交互的新阶段。通过集成三维无标识跟踪、动态遮挡解算、5G边缘计算以及自动化序列规划，AR技术有效解决了复杂装配中信息密度过载、操作空间受限及专家资源短缺的核心矛盾。未来，AR、数字孪生与人工智能的“三位一体”融合，将成为推动复杂装备制造工艺水平向全球价值链顶端迈进的关键技术驱动。

参考文献

- [1] 魏祺, 郭宇, 汤鹏洲, 等. 增强现实在复杂产品装配领域的关键技术研究与应用综述[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(03): 649-662.
- [2] 梁剑斌, 何汉武, 吴悦明, 等. 增强现实环境下装配操作感知方法研究[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(02): 297-304.
- [3] 曹鹏霞, 李文新, 黄羿博. 基于边云协同和增强现实的智能装配方法[J]. 计算机工程与科学, 2025, (10): 1867-1876.
- [4] 丁志昆, 孙奕程, 段亮亮, 等. 基于数字孪生的增强现实多人协作装配[J]. 计算机集成制造系统, 2023, (06): 1823-1834.
- [5] 王强, 范秀敏, 何其昌, 等. 面向人机协作装配规划的AR仿真交互与人因评估[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(02): 401-410.
- [6] 袁庆曙, 王若楠, 潘志庚, 等. 空间增强现实中的人机交互技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(03): 321-332.
- [7] 李骏, 朱洪波, 黄罡, 管海兵. 5G工业互联网体系核心技术、平台构架与行业应用[J]. 电信科学, 2021, 37(01): 129-136.
- [8] 尹文泽. 装配示教和引导的增强现实技术研究与实现[D]. 电子科技大学, 2022.
- [9] 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]. 上海交通大学, 2018.
- [10] 蓝珊. 人工装配过程增强现实辅助技术研究[D]. 华中科技大学, 2018.