

计算机集成制造系统
Computer Integrated Manufacturing Systems
ISSN 1006-5911, CN 11-5946/TP

《计算机集成制造系统》网络首发论文

题目：基于数字孪生的 AR 多人协作装配方法
作者：丁志昆，孙奕程，段亮亮，刘世民，鲍劲松
网络首发日期：2022-08-29
引用格式：丁志昆，孙奕程，段亮亮，刘世民，鲍劲松. 基于数字孪生的 AR 多人协作装配方法[J/OL]. 计算机集成制造系统.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220826.1833.008.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于数字孪生的 AR 多人协作装配方法

丁志昆, 孙奕程, 段亮亮, 刘世民, 鲍劲松⁺

(东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 为了保证复杂产品在关键装配阶段的一次成功率和质量一致性, 提出了一种基于数字孪生的增强现实 (Augmented Reality, AR) 多人协作装配方法。首先提出了基于数字孪生的 AR 多人协作装配架构, 并依据协作装配的复杂性对装配序列进行过程分解。其次, 将装配过程上下文数据构造为装配工艺知识图谱, 明确了协同过程装配信息的传递与迭代机制, 提高了 AR 协作装配的工况自适应性。在此基础上, 采用基于根锚点的协同方法, 实现多人装配过程的 AR 场景协同, 并依赖装配工艺知识图谱提供的实时知识实现数据协作, 保证了协同装配的质量和效率。最后, 以某钢厂复杂轧机的装配为例, 建立了基于增强现实的多人协作数字孪生装配系统, 验证了论文方法的有效性和可行性。

关键词: 数字孪生装配; 多人协作; 知识图谱; 增强现实

中图分类号: TH166

文献标识码: A

AR multiplayer collaborative assembly method based on digital twin

DING Zhikun, SUN Yicheng, DUAN Liangliang, LIU Shimin, BAO Jingsong⁺

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to ensure the first-time success rate and quality consistency of complex products in key assembly stages, an AR multi-person collaborative assembly method based on digital twin is proposed. Firstly, an AR multi-person collaborative assembly architecture based on digital twin is proposed, and the assembly sequence is decomposed according to the complexity of collaborative assembly. Secondly, the assembly process context data is constructed as an assembly process knowledge map, and the transmission and iteration mechanism of collaborative process assembly information is clarified, which improves the working condition adaptability of AR collaborative assembly. On this basis, the collaborative method based on root anchor points is used to realize AR scene collaboration in the multi-person assembly process, and relying on the real-time knowledge provided by the assembly process knowledge graph the data collaboration is realized, which ensures the quality and efficiency of collaborative assembly. Finally, taking the assembly of a complex rolling mill as an example, a multi-person collaborative digital twin assembly system based on augmented reality is established, and the effectiveness and feasibility of the thesis method are verified through multi-person collaboration in process assembly.

Keywords: digital twin-based assembly; multi-person collaboration; knowledge graph; augmented reality

0 引言

随着产品朝着大型化、高负荷、高性能的方向发展，设备的装配流程和装配工艺也趋于复杂化。由于装配过程的复杂性，部分装配由单人操作无法完成，而是以多人协作装配实现。在设备生产的生命周期中，协作装配环节成为了影响设备整体生产精度和效率的关键^[1]。协作装配过程的关联性和复杂性导致了员工记忆和认知的负荷加大，操作员间的磨合时间也降低了设备的装配效率^[2]。

考虑多人装配过程间的协同问题，专家学者引入增强现实（Augmented Reality, AR）技术实现装配指导，将装配工人从沉冗的装配工艺信息中解放出来。然而，现有的 AR 辅助装配都是在理想情况下，依靠静态模型和数据的可视化实现装配引导，而系统程序性的指导模式缺乏对工况的自适应性，无法应对时变性的多人协同装配场景。同时，由于指导场景的独立分布，场景间的信息隔离成为协作装配过程的巨大障碍。

对此，研究人员引入了数字孪生技术以满足多人协作装配指导的自适应性，它能够对装配工艺和现场装配工况进行虚实映射，实时迭代装配工艺。然而，当多人协同关系较为复杂时，独立的数字孪生系统忽略了人在装配过程中的重大影响。这是因为操作人员在现场信息传递和反馈数据存在延时，导致了协同过程信息的滞后，产生了多个交互的真空期，难以形成高保真的虚实映射，以保障数字孪生子系统间的高效协同。

针对现有的装配方法在面向协作装配的工况时协同性和工况自适应性的不足，本文结合数字孪生技术和 AR 技术，提出了基于数字孪生的 AR 多人协作装配方法。首先，提出了基于数字孪生的多人协作装配体系，可针对不同装配过程进行协同装配序列的设计。其次，从流程协作，场景协同和数据协作三个方面对装配方法进行分析，实现装配工艺信息的实时迭代和更新，提高了对多种工况的自适应性，消除了员工的沟通障碍，保证了产品装配过程中的时序性闭环控制。

1. 相关研究

AR 技术能够帮助操作员完成装配过程的上下文感知协助、数据可视化和交互^[3]，这为装配模式的智能化转变提供了契机。数字孪生作为产品全生命周期的管控技术，同样不断推动产品向高精度发展。本节针对数字孪生装配、AR 装配、多人协同装配三个方面进行文献研究与分析。

1.1. 基于数字孪生的装配方法

数字孪生通过虚拟和真实的交互式反馈，数据融合分析，决策迭代优化等方式可实现装配过程的虚实映射。在数字孪生装配方法架构方面，Qi 等^[4]提出了支持制造的工业 4.0 数字孪生框架，为

数字孪生功能的实现提供方案。郑等^[5]提出了一种基于数字孪生的车间建模框架,实现车间物理空间和信息空间的深度融合。在装配工艺优化方面,Zhang 等^[6]从工艺优化率和工艺致信度的角度出发,实现数字孪生微装配产品的装配工艺优化。Sun 等^[7]针对高精度产品的装配质量一致性差问题提出了装配调试的数字孪生驱动方法,进行装配预测和装配调试过程的优化。在装配过程控制方面,Zhuang 等^[8]提出了基于数字孪生的复杂产品装配数据管理和工艺追溯方法,实现了对于装配过程动态数据的管理和装配过程的回溯。然而,目前数字孪生装配过程中数据传输和装配优化存在迟滞性,实时性不足,无法兼顾装配质量和装配效率。

1.2. 基于 AR 的装配方法

为了改变传统的装配模式,国内外学者对增强现实技术在装配领域的应用展开了大量的探索。在 AR 辅助场景构建及场景编辑方面,Li 等^[9]通过建立基本装配工艺模型,解决了增强现实装配的工艺信息内容编辑困难的问题;在提高 AR 场景注册过程的鲁棒性和适用性方面,王等^[10]提出了一种基于点云和视觉特征融合的三维跟踪注册方法,Zhang^[11]提出一种基于图像匹配的增强现实系统跟踪注册方法。在装配信息可视化方面,Li 等^[12]利用 AR 作为可视化平台实现复杂航空连接器不匹配引脚的检查以保证线束组装的准确性;Chiew 等^[13]考虑装配过程的复杂性,基于 AR 进行装配过程的全流程可视化指导;Laviola 等^[14]提出最小 AR 系统的概念,用于优化装配过程的 AR 系统的视觉资产。在装配过程优化方面,Feng^[15]和 Fu^[16]对 AR 辅助装配场景的感知进行研究,提升了系统的智能化;Makris^[17]和 Vanneste^[18]分别对 AR 系统的集成度和可视化方式进行研究,提高了装配过程的独立性和装配效率。分析可知,目前的 AR 装配指导拘泥于固定的场景和流程,其柔性存在不足,难以识别和处理变化的装配工况。

1.3. 多人协作装配方法研究

为提高多人协作装配的效率,部分学者对复杂装配工况下的协同方法展开了研究。胡勇等^[19]提出了支持多用户的实时交互操作的装配方法,但只能应用虚拟环境下的装配演练,无法在实际装配过程中进行指导,且无法满足现场多变的装配环境;Zhou 等^[20]提出了基于智能理解的冲突层次化消解方法,然而整个协同过程的研究主要还是集中在装配设计上,无法满足面向过程的装配优化问题。Zhang 等^[21]提出一种基于着色 petri 网(CPN)的协同装配方法,但其主要协同对象为机器人,只能应用于高度自动化的装配过程。Zhang 等^[22]和 Lv 等^[23]研究复杂装配过程中的人机协同问题,提出了不同的算法策略,以优化装配方案,然而研究的侧重点是装配安全性和人与机器的协同效率,没有考

虑装配过程中人与人的协同关系及装配工艺的优化。由上可知，在多人协作装配过程中同时考虑协同性和装配质量稳定性的研究还存在空白。

2. 基于数字孪生的多人协作装配体系

为了满足复杂装配场景的应用需求，本节分析了协同场景的复杂性，提出了基于 AR 和数字孪生技术的多人协作装配方法架构，并对数字孪生协同装配序列进行了分析。

2.1. 多人协作装配过程

在复杂产品的装配中，装配工艺通常包含多个复杂的装配工序，装配工序存在高精度的装配需求，且工序间存在着紧密的协调关系。多人协同装配能够大大提高装配效率，却依赖于高效的任务协同。多人协作装配一方面依赖于管理员对任务的宏观把控、快速分配，另一方面受限于现场装配人员对任务的理解以及装配操作。

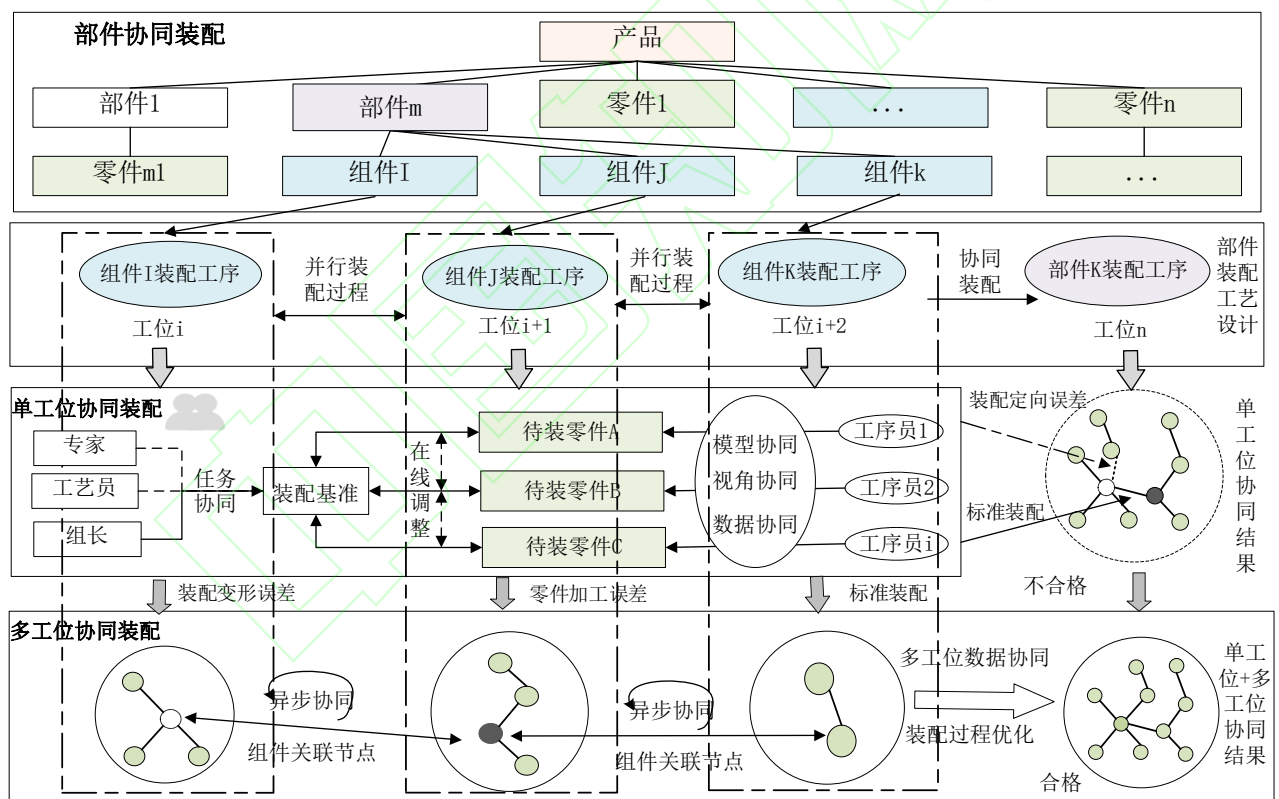


图 1 复杂产品的协作装配过程

如图1所示，本文将多人协作装配过程分为单工位装配协同和多工位装配协同两部分，分析如下：

（1）单工位下的复杂产品装配过程

当组件的装配工艺复杂时，多个员工在视角不一的情况下在同一工位进行不同的操作，这个任

务协同过程为单工位协同装配。装配过程中，专家负责工艺设计，工艺员审核工艺方案，按工艺流程设计装配工艺卡，组长对现场进行管理，指导和规划工序员进行装配任务，协同工序员完成任务。协同过程主要聚焦于组长和工序员之间，且组长是协同的主要决断者。装配过程中，根据工艺卡信息，同一工位下不同人对装配对象、装配信息的了解存在其独立性和交叉性。此时，快速提取个人装配任务和装配协同关系，并对信息统一、正确的获取和表达，是实现现场工人对装配细节有效把控的关键。此外，由于装配质量指标存在一定公差范围，需要系统根据现场工况协调、优化装配参数，并闭环控制装配过程，保证协同装配的质量稳定性。

（2）多工位复杂产品协同装配过程

当产品装配公差要求高，组成环数多时，部件的装配误差不仅仅聚焦于组件之间的协同装配，还需考虑组件装配过程中零件加工误差、装配变形误差、装配定向误差的累计误差造成产品不合格的问题。装配过程基于子装配体的装配关系和装配精度进行协同优化操作，并通过自上而下的方式实现对子组件装配的宏观把控和异步协同为多工位协同装配过程。由于子组件工位的独立性，协同过程工位间信息的协同计算与反馈，是实现精度预测和过程优化的重要途径。

2.2. 融合 AR 的多人协作装配方法

为了保证装配过程的高效性，本文对协同装配过程进行优化，构建了基于数字孪生的 AR 多人协作装配架构。如图 2 所示，数字孪生空间中，首先对三维模型和装配工艺信息进行处理，以获取抽象的装配属性信息和关系信息，它们被用于工艺知识的表达。然后，以“实体—关系—实体”、“实体—属性—值”的方式组织装配工艺语义信息，并进行装配工艺知识图谱的构建。基于知识图谱进行对象映射，以构建装配工艺孪生体。知识图谱的每一个节点都是物理对象的孪生体表达，根据层级不同将其分为对象级孪生体和装配级孪生体，两者的区别在于装配级孪生体同时包含属性信息和工序信息，数字孪生体是装配工艺管理和数据协同的基础。

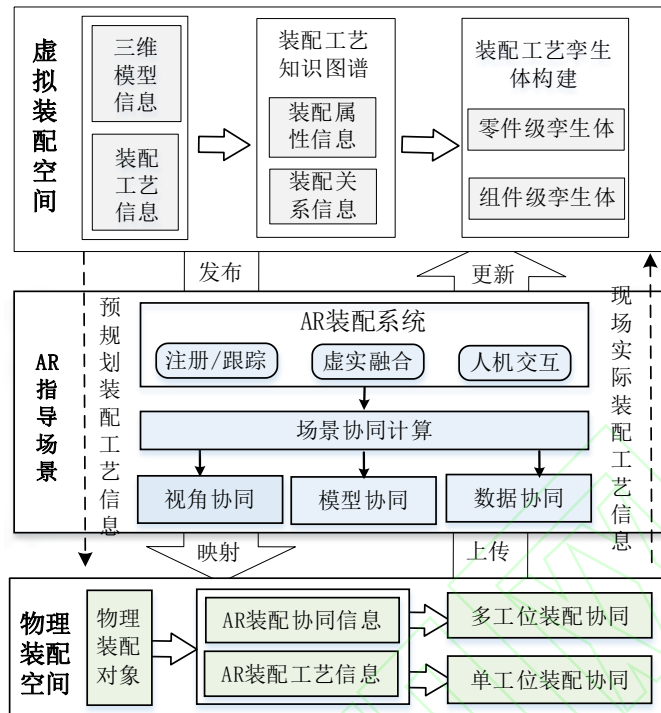


图2基于数字孪生的AR多人协作装配架构

AR 指导场景作为物理装配空间和数字孪生装配空间的桥梁，用于装配过程的引导和协同。AR 系统通过装配工艺知识图谱中节点的协同属性信息进行操作员任务的发布和可视化，并进行协同 AR 空间的构建。通过多设备的协同和控制，实现操作员单工位协同下的模型协同、视角协同和数据协同。

物理装配空间通过 AR 系统获取装配工艺信息和协同信息，并基于 AR 的可视化引导完成协同装配任务。为了满足不同协同任务的指导，AR 系统满足独立性和协同性。独立性是针对不同工位能够实现不同的装配引导，保证单工位协同的装配指导工作。协同性是在多工位协同时能基于其他工位的工况进行自调节，保证整体组装满足工艺规范。

数字孪生空间能够基于装配工艺设计对物理空间的装配进行指导，通过虚实映射过程保证装配过程的规范化和高效性；物理空间的装配工况变化也会推动数字孪生体的演变，通过以实返虚的方式来保证数字孪生装配过程的高保真性。

2.3. 基于数字孪生的 AR 多人协作装配序列分解

基于数字孪生的 AR 多人协作装配架构，本节面向协同装配过程对整个装配序列进行分解，如图 3 所示。

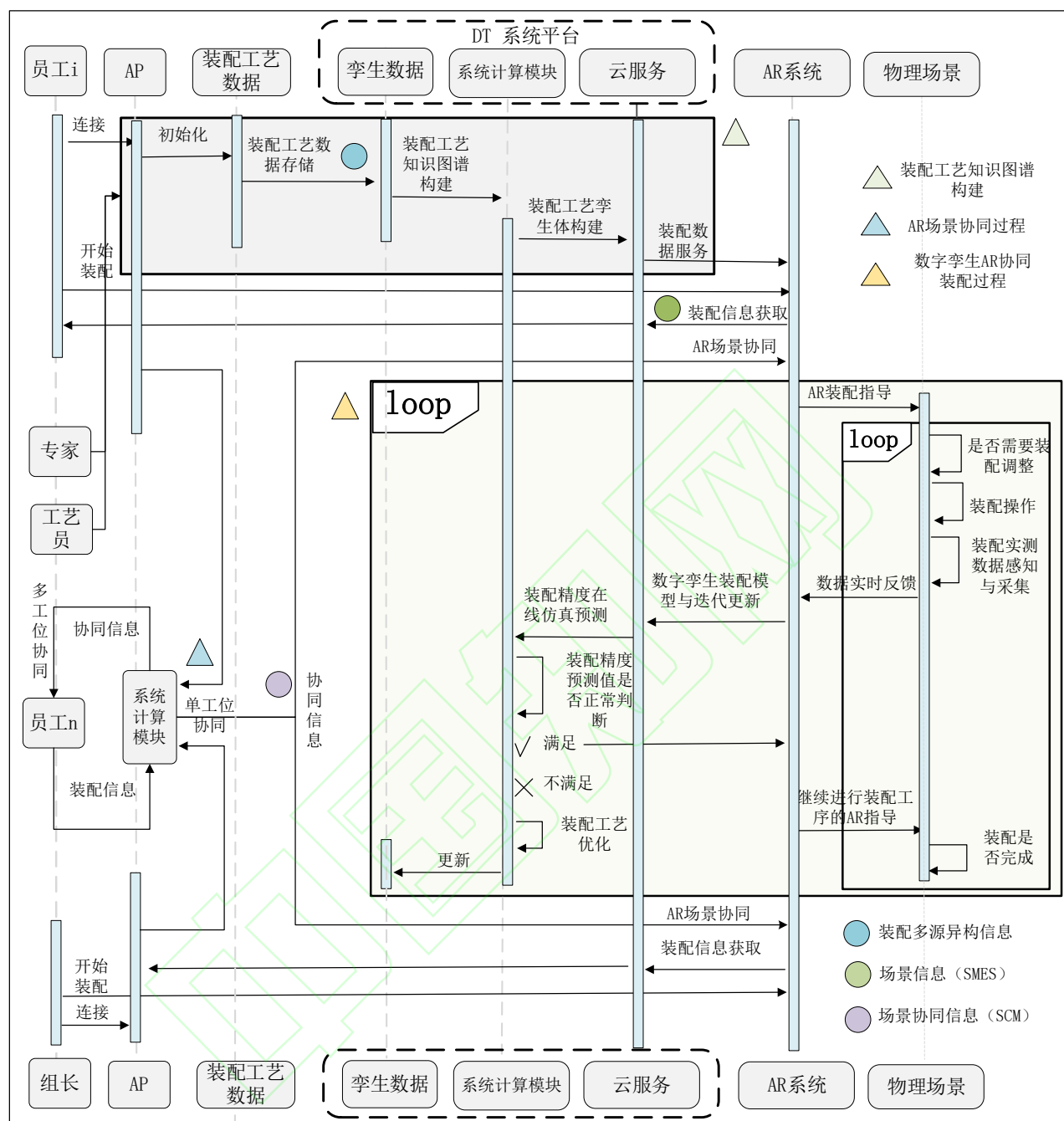


图3 基于增强现实的多人协作数字孪生装配流程

装配序列主要包括装配工艺孪生体构建、AR 场景协同及 AR 协同装配指导三个过程，具体步骤如下：

(1) 装配工艺孪生体构建:专家及工艺员首先获取装配工艺资源信息，对其多源异构信息进行处理和存储。对于三维装配模型信息进行装配要素信息抽取，并基于装配特征信息获取装配的结构信息；装配工艺设计信息则经过装配语素分解和装配词分类，最终进行装配关系的构建。根据装配

规划获取的结构信息和装配关系建立装配工艺知识图谱，并实现装配孪生体构建，数字孪生体存储了协作装配过程的全要素信息。

(2) AR 场景协同:AR 系统通过装配对象的数字孪生体获取该对象的协同信息，用于场景和数据的协同。系统计算模块会在图像跟踪的基础上进行 AR 场景的协同，同时，根据装配的类别确定协同类别，针对单工位协同和多工位协同的区别进行协同参数的初始化，为后续的装配建立 AR 协同装配环境。如图 3 所示，组长和员工 i 主要是面向复杂装配工序进行单工位协同，物理装配信息的集成和系统计算模块对数据的处理保证了与员工 n 的多工位协同过程。

(3) AR 协同装配指导：物理装配过程中，系统通过 AR 技术将装配工艺参数和引导动画呈现在操作员的视野中进行装配指导，同时实时感知和采集产品装配过程中的多维度装配实测数据，数据通过 AR 系统实现物理空间向孪生空间的数据传递。孪生空间基于系统计算模块进行协同计算，基于装配尺寸链的计算能够实现装配精度监控，基于知识图谱的误差溯源能够快速聚焦误差源，实现面向过程的装配优化调整。最后通过 AR 系统将分析结果进行可视化，引导操作员进行优化操作或进一步装配，直到装配任务完成。

数字孪生 AR 协同装配系统不仅能进行单工位的装配协同，还能对多工位的装配信息进行统筹分析，通过虚实融合实现装配过程的实时、闭环控制，在提升装配效率的同时满足产品的质量要求。

3. 基于 AR 的数字孪生多人协作方法

复杂产品的装配工况时变性强，工艺数据呈多样性、复杂性、时序性，同时多人协同过程存在随机性，突变性。考虑多人协同装配的场景需求，本文利用 AR 技术搭建物理空间和数字孪生空间沟通的桥梁，提出数字孪生多人协作装配方法。本节将从流程协作、场景协同和数据协作三方面出发，对数字孪生协同装配方法进行阐述。

3.1. 流程协作

本节以工序为基本单元构建了图 4 所示的基于增强现实的数字孪生多人协作装配流程，描述了协同过程装配信息在物理装配场景、数字孪生空间之间传递与迭代机制。

如下图所示，在确定好产品的装配工艺后，孪生空间以知识图谱的方式进行装配信息存储表达，以节点表示装配信息，边表示装配关系。装配工艺知识图谱的每个节点都是一个数字孪生体，是对物理对象的抽象表达，节点所形成的知识网络则能够对整个装配工艺进行表达。AR 系统基于装配工艺知识图谱可获取到整个装配过程的工序集合(Assembly Process Set, APS)，APS 是对预规划装配工

$$APS = \sum_{i=1}^n (SAI_i \cup APPI_i \cup ACI_i) \quad (1)$$

考虑装配工序的复杂性, 将其拆分为不同工步组合以进行不同类别的 AR 协同指导。整个 APSi 过程用装配工步组合 (Assembly Step Set, ASS) 表示, 其中 $ASS = \{AS_0, AS_1, \dots, AS_n\}$ 。操作人员通过系统获取分配的 ASS_i 来获取对应的装配工步组合与对应的装配要求、装配特征、装配要素等信息。针对具体的装配情况可分为两种装配协同类别 (Assembly Cooperation Category, ACC), 即单工位协同装配工艺和多工位协同装配工艺。AR 系统会针对 ACC 的不同进行不同的协同指导, 基于装配工艺信息和装配模型信息, 系统会生成增强现实可视化信息 (Augmented Reality View Information, ARVI) 用于辅助装配。

$$ARVI = \Sigma(UI \cup MBD \cup AAN) \quad (2)$$

MBD(Model Based Definition)模型用于对 SAI 信息的 AR 展示,装配动画(Assembly Animation AAN)用于 APPI 的可视化表达,UI(User Interface)信息会对ACI及工艺属性信息进行表达,操作人员基于 ARVI 进行顺序装配过程,实现 ASS 进程的推进。ASS 在物理空间的执行过程中,系统通过对物理装配工艺信息 (Physics Assembly Process Information, PAPI) 进行获取,包括零件加工数据 (Part Manufacturing Data, PMD)、装配过程数据集 (Assembly Process Data, APD)、装配变形数据 (Assembly Deformation Data, ADD)。

$$PAPI = \Sigma(PMD \cup APD \cup ADD) \quad (3)$$

PAPI 信息会通过人机交互过程直接反馈到装配工艺知识图谱,通过对该装配工序的孪生对象的装配数据分析计算,预测出当前孪生对象的状态,然后根据状态进行分布式优化。首先对 APSi 进行优化调整,其次根据装配工序类别 (ACC) 进行子系统的 ACI 信息的更新。APSi 的优化会基于实际的装配工况,根据分析计算的结果对不同程度的误差进行调节,可进行装配调优,装配修正,装配返工的差别优化过程。装配修正和装配返工主要是针对单工位的装配误差问题,装配调优则是针对多工位协同过程装配尺寸链导致的累计误差。ACI 的更新则是对于 ARVI 的更新,将优化结果通过 AR 系统进行发布,通过 UI 实现员工装配过程的工艺优化指导和错误示警。

3.2. 基于根锚点的 AR 场景协同

AR 系统的一个主要特征是将计算机生成的 3D 图形叠加到物理空间来完成操作指导,这能够满足大部分的指导需求。然而,当多个操作人员存在的时候,独立的 AR 空间无法满足信息共享和交互操作的需求。为了打破信息的隔离,实现多人的协同操作,本文基于根锚点对齐的方法构建共享 AR 空间,实现场景的协同。

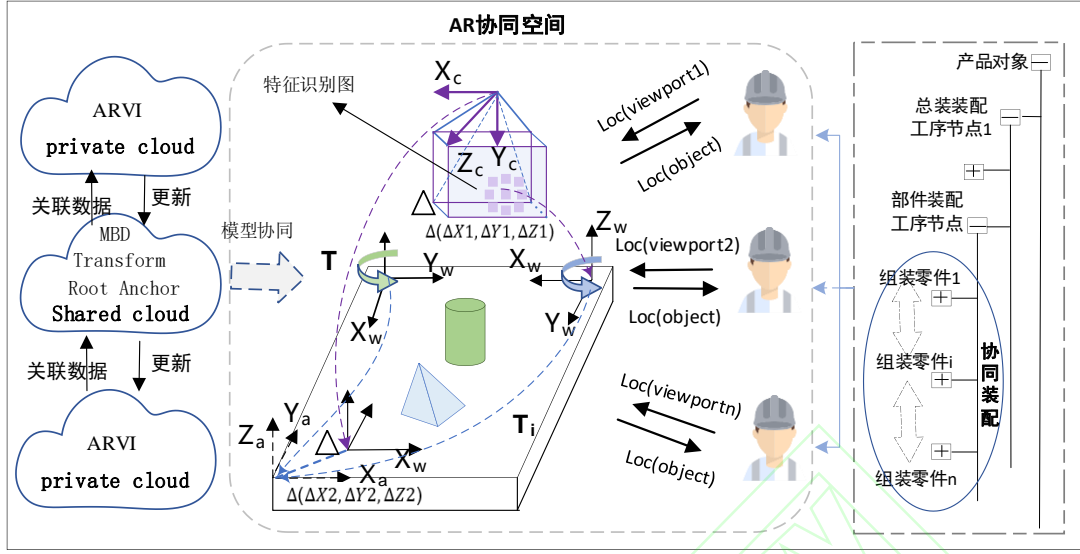


图5场景协同原理

场景协同原理如图 6 所示，当针对某个装配工序进行协同装配时，每个操作员会相应的创建一个 AR 协同空间，针对每一个 AR 空间，AR 相机会确定一个唯一的世界坐标系，我们通过建立根锚点（Anchor Root）为（0,0,0）来确定坐标系的原点位置，而所有加载对象也将会作为其子对象进行 AR 加载。场景协同实现的基础是多个设备坐标系的统一，使得所有加载模型在多个 AR 空间有一个唯一的空间坐标。

多个虚拟场景根锚点的位置对齐是实现坐标系统一的关键，本节基于两台设备物理空间重合点，并通过相对坐标的偏移计算来实现整个协同过程。基于图像跟踪技术能够确定物理空间公共点的位置信息，为了降低协同计算的复杂度和系统的环境自适应性，将特征识别图存储在系统内，通过对手机屏幕识别图的定位能够快速获取设备间的公共坐标点，特征识别图与根锚点的相对坐标被用于实现另一台设备根锚点的位置对齐，进而实现坐标系的统一。

首先确定协同校准的基准设备 S，由于 AR 场景加载过程摄像头处于非固定状态，我们获取校准时刻的相机坐标 $V_{ecp} (X_p, Y_p, Z_p)$ 作为特征识别图的中心坐标，考虑不同设备的摄像机偏移量，得到其实际的中心坐标为 $V_{ecp} (X_p + \Delta X_1, Y_p + \Delta Y_1, Z_p + \Delta Z_1)$ 。为了实现根锚点的对齐，计算根锚点相对特征识别图的局部坐标作为坐标偏移量。考虑虚拟空间的坐标转换准则，自身坐标系下矩阵变换顺序为 Y 轴到 X 轴再到 Z 轴。因此，基于转换准则进行世界坐标系 W 向局部坐标系 L 转换，其中 a, b 为转换过程的过渡坐标系。公式表示为：

$$Rot_W^L = Rot_b^L Rot_a^b Rot_W^a \quad (4)$$

基于矩阵运算获取特征识别图下的根锚点局部坐标为 $V_{eca} (\Delta X_2, \Delta Y_2, \Delta Z_2)$ ：

$$V_{eca} = R_W^L * \text{Tr}(X_p + \Delta X_1, Y_p + \Delta Y_1, Z_p + \Delta Z_1) * V_{ecp} \quad (5)$$

客户端在进行设备校准是，基于 ARCore 图像跟踪技术可获取到特征识别图空间坐标 V_{ect} (X_t, Y_t, Z_t)，由于识别特征点云的偏移会导致校准结果的偏差，通过协同过滤方法，消除定位偏移的虚假坐标，并对数据进行分组处理，计算加权算术平均值：

$$X' = \frac{\sum_{i=1}^n x_i f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} = \frac{x_1 f_1 + x_2 f_2 + \dots + x_n f_n}{f_1 + f_2 + \dots + f_n} \quad (6)$$

得到特征识别图最终坐标值：

$$V_{ect} = (X'_t, Y'_t, Z'_t) \quad (7)$$

由于两台设备拥有相同的屏幕坐标，通过确定相同的坐标偏移即可进行坐标系的统一。将客户端的根锚点转到特征图的局部坐标系下，并设定相同的坐标偏移量 V_{eca} 。基于已有的坐标偏移量和特征识别图空间坐标的转角 V_{ecr} ($\theta 1, \theta 2, \theta 3$)，将根锚点坐标转到世界坐标下进行对齐。根据世界系下矩阵变换规则，以 z-x-y 旋转顺序旋转获得根锚点的变换矩阵。公式表示为：

$$R_L^W = \text{Rot}(Y, \theta 2) \text{Rot}(X, \theta 1) \text{Rot}(Z, \theta 3) \quad (8)$$

得到根锚点在世界坐标系的坐标为：

$$V_{eca2} = \text{Tr}(X'_t, Y'_t, Z'_t) * R_L^W * V_{eca} \quad (9)$$

其中： $\text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} M(x, \theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵， $M(k, \theta) = I + \sin \theta R_{\vec{k}} + (1 - \cos \theta) R_{\vec{k}}^2$ 为三维空间中任意向量绕轴 \vec{k} 逆时针旋转 θ 角度的旋转矩阵， I 为 3×3 的单位矩阵， $R_{\vec{k}}$ 为 \vec{k} 的叉积矩阵， $\text{Tr}(x, y, z) = \begin{bmatrix} I & (x, y, z)^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为平移矩阵表达。

对于不同设备进行空间校准后，各个 AR 空间的根锚点在世界坐标系的数值不同，但在物理空间却处于对齐状态，Anchor Root 成为共享 AR 空间的公共坐标系的原点。共享坐标系下，AR 资产只需作为其子物体存在并保证局部坐标的一致性即可实现空间坐标的协同。

场景协同除了保证共享 AR 空间的坐标协同，还需要在其基础上实现 AR 资源的协同。AR 资产的协同主要实现 AR 资源加载和对象交互过程的同步，这主要基于一个实时的共享云存储空间

(Shared Cloud)，用于存储协同信息。将 MBD 模型存储到共享空间，由于 AR 场景是面向过程创建的，通过对共享空间的监控，能够保证模型加载和移除的一致性。变换 (Transform) 信息用于储存资源交互属性，即模型的移动、旋转、缩放等操作，系统通过对其进行实时更新保证模型交互的协同性。

通过 AR 场景的协同，操作员能够基于协同视角进行装配任务，自然的交互也保证了协同信息的有效传递。

3.3. 数据协作

在实现 AR 装配视角统一的情况下，接下来对数据协作原理进行确定，数据协作主要包括数据和语义的集成以及数据的迭代和更新两个过程。

3.3.1. 基于知识图谱的数据和语义集成

装配工艺知识图谱是数字孪生平台本体关系创建和孪生体知识表达的基础，本文在陈^[24]定义的装配语义关系基础上进行完善，进行装配工艺知识图谱的构建和语义信息表达。

对象实体的属性信息用“实体-属性-值”的方式表达，用“Is”表示。装配节点之间的实体关系用“实体-关系-实体”的方式表达，主要包括结构关系，序列关系和调整关系。结构关系主要表达对象间的包含关系，用“Has”表达。序列关系主要为装配工序或工步之间的先后、并行、重复等逻辑关系，分别用“Sequence、Parallel、Recycle”表达。调整关系主要用于表达装配工过程的协同优化关系，分别用“AAO(Assembly adjust and Optimize, 装配调优)、AC(Assembly Correction, 装配修正)、AREW(Assembly Rework, 装配返工)、AREP(Assembly Repair, 零件修配)、AAM (Assembly Adjustment Method, 调整装配)”表达。以上语义关系的集成表示如公式（10）所示：

$$S = \sum_{i,j=1}^n \text{Has}((E_i, F_j), (O_i, X_j)) \cup \sum_{i,j=1}^n \text{Sequence}(O_i, O_j) \cup \sum_{i,j=1}^n \text{Parallel}(O_i, O_j) \cup \sum_{i,j=1}^n \text{Recycle}(O_i) \cup \sum_{i,j=1}^n (\text{AAO}(O_i, O_j), \text{AC}(O_i, O_j), \text{AREW}(O_i, O_j), \text{AREP}(O_i, O_j), \text{AAM}(O_i, O_j)) \quad (10)$$

如图 5 中数字孪生空间的协同装配语义表达，描述了装配过程从工艺信息模型、工序信息模型到工步信息模型的层级表达。通过知识图谱的节点属性和语义关系，能够对工艺数据协同和场景数据协同进行监控和迭代，以适应面向过程的协同装配任务。

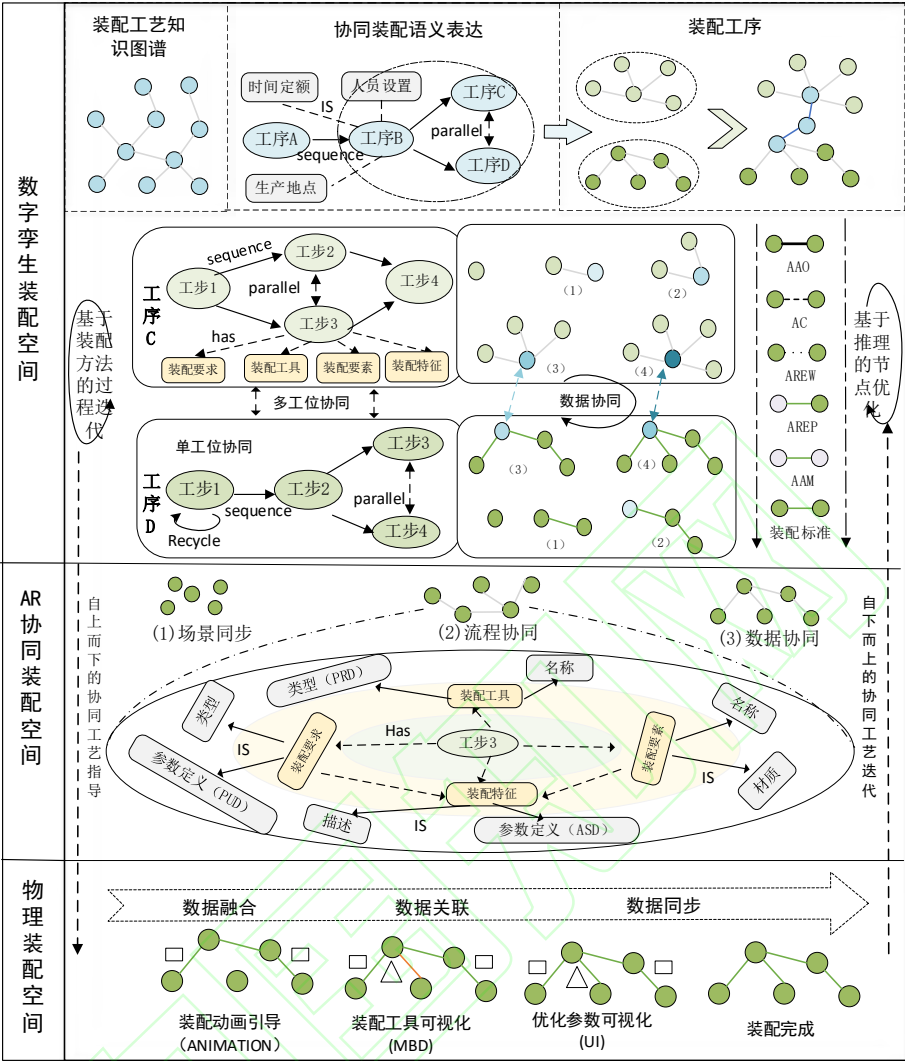


图6 AR辅助装配数据协作过程

1) 工艺数据协同

工艺数据协同过程通过对装配环的宏观把控，实现自上而下的多工位协同工艺规划，同时依赖自下而上的单工位协同工艺的迭代来保证装配过程的实时性。多工位的协同更加注重装配级数字孪生体之间的数据融合与迭代，如图 6 所示，数字孪生空间用装配工序子图对装配工序表示，其中绿色节点代表对象级孪生体，蓝色节点代表装配级孪生体。装配级孪生体是装配工序子图的关键节点，映射到物理空间代表着关键的装配环。多工位的协同装配过程主要通过 AR 系统实时获取各个工序的装配精度来实现对装配级数字孪生体的监控，将已有的装配精度信息作为先验知识，经过协同计算实现协同精度的预测。

多工位的协同能够对装配级孪生体的工艺进行实时优化，而单工位的装配协同则使实际装配朝着预规划的方向推动。AR 系统通过对象级数字孪生体的属性信息获取，能够基于装配工艺设计信息

进行装配过程的规范化和精准化。单工位协同的装配进程会不断影响装配级孪生体的精度等级，图中用蓝色的深浅进行表示。通过虚实映射过程，能够获取单工位下的装配尺寸链信息，通过公差推理计算，能够对装配封闭环进行有效监督与优化。针对调整优化的语义信息，AR 系统能够指导员工进行包括 AAO、AC、AREW、AREP、AAM 的协同优化，图中用双节点对关系进行描述。

2) 场景数据协同

基于装配工艺知识图谱获取的资源信息能够实现 AR 辅助场景的实时构建，随着知识图谱的迭代更新，基于 ARVI 数据 AR 系统能够保证指导场景的环境自适应性，通过 UI、AAN、MBD 的可视化引导，以满足面向过程的场景数据协同。

场景数据协同就是共享 AR 空间的信息协同表达，本文将场景信息属性分为三种，分别为公有信息(Public Data, PUD)、私有信息(Private Data, PRD)、关联信息(Associated Data, ASD)。

场景数据协同过程中，PUD 主要满足单工位下的可视化协同，即在协同空间下可视化或操作共有的模型对象。PRD 主要面向任务的多样性，协同空间下，由于不同工序员的装配任务不同，例如工装、定位、测量、校准，信息的私有化定义能够实现不同任务下的自适应引导。PRD 能保证 AR 可视化起到引导作用而不是对协同人员的干扰影响。ASD 是装配工艺关联信息的集合，不管是单工位协同还是多工位协同装配都存在着装配误差的传递和装配的相互影响，装配过程中关联信息的更新与优化是实现装配质量稳定性的关键。

3.3.2. 协作过程数据的迭代和更新

基于已有的协同规则，通过对协同数据的推理计算能够满足装配过程的优化。考虑实际的协同场景，将协同计算分为装配精度监控和装配误差溯源两部分。

(1) 基于装配尺寸链的装配精度监控

由于复杂产品装配流程长、工序复杂，装配推进过程中误差的传递、累计和演化，可能导致最终的装配质量不达标，通过装配过程的推理计算能够实现物理装配过程的实时跟踪。基于装配信息的存储和定义规则，能够通过数字孪生平台的装配级孪生体获取组件的装配精度和装配关系，进而计算整个工艺的装配累计误差^[25]，累计误差变动矩阵计算表达如公式（10）所示。

$$\mathbf{E}_n^V = \mathbf{E} + \mathbf{T}_n^V - \mathbf{T}_n^0 = \mathbf{E} + \mathbf{E}_1 \times \prod_{k=1}^n (\mathbf{M}_k \times \mathbf{T}_{i,j+1}) - \prod_{k=1}^n \mathbf{M}_k \quad (11)$$

式中：E 为单位矩阵。 \mathbf{M}_k 为装配误差在装配节点间传递的变换矩阵。 \mathbf{T} 为装配工位装配结合面几何要素相对装配基准的位置变换矩阵， \mathbf{T}_n^V 和 \mathbf{T}_n^0 分别为实际装配过程与规划装配设计的位姿变换矩

阵。

由于 AR 装配指导是以装配工序为装配基本单元的过程装配，基于装配精度监控与预测能宏观把控装配误差范围，实现自上而下的装配精度层级控制。通过控制装配单元的装配协同误差来降低累计装配误差的影响，保证装配体的质量稳定性。

(2) 基于知识图谱的装配误差溯源

装配累计误差计算结果会被用于后续的装配误差溯源^[26]。当预测公差或实际装配公差超出工艺要求范围时，系统会基于装配知识图谱的装配语义关系和实体属性，进行装配误差溯源，找出影响装配精度的关键装配节点进行修配或装配调整。误差溯源过程如下：

首先通过装配节点的出强度 ES_i^{out} 与入强度 AS_i^{in} 的比值对节点波动系数 k 进行计算：

$$k_i = \frac{ES_i^{\text{out}}}{AS_i^{\text{in}}} = \frac{\sum_{j \in N_i} \omega_{ij} a_{ij}}{\sum_{j \in N_i} \omega_{ji} a_{ij}} \quad (12)$$

式中： ω_{ij} 为装配节点 i 对装配节点 j 的影响权重， a_{ij} 表示装配节点之间是否有权重连接。

为了确定关键的误差节点，通过图节点关系对回溯路径集合 C_a 进行回溯。将误差经过装配工艺知识图谱传播到达关键节点的累计量作为节点 x 的影响力。路径中各个装配节点的传播系数为受到影响后的波动系数，波动系数的表达如下：

$$IR_x = ES_r^{\text{out}} \prod_{j \in c_{ai}} k_j \quad (13)$$

式中： c_{ai} 为集合 C_a 中第 i 条路径， j 为在路径 i 中从待溯源的目标节点 x 到关键节点之间的所有节点。

通过误差溯源计算，回溯路径集合中波动系数最大的节点被确定为关键误差源节点，只须对该节点的装配工艺进行调整就能实现装配优化。装配工艺迭代优化的实现主要通过调整装配节点的装配误差权重和属性，并通过 AR 系统进行发布，更新的工艺信息会被用于物理装配过程的自优化。

4. 案例验证

本文基于上述方法开发了基于增强现实的多人协作数字孪生装配系统，如图 7 所示。

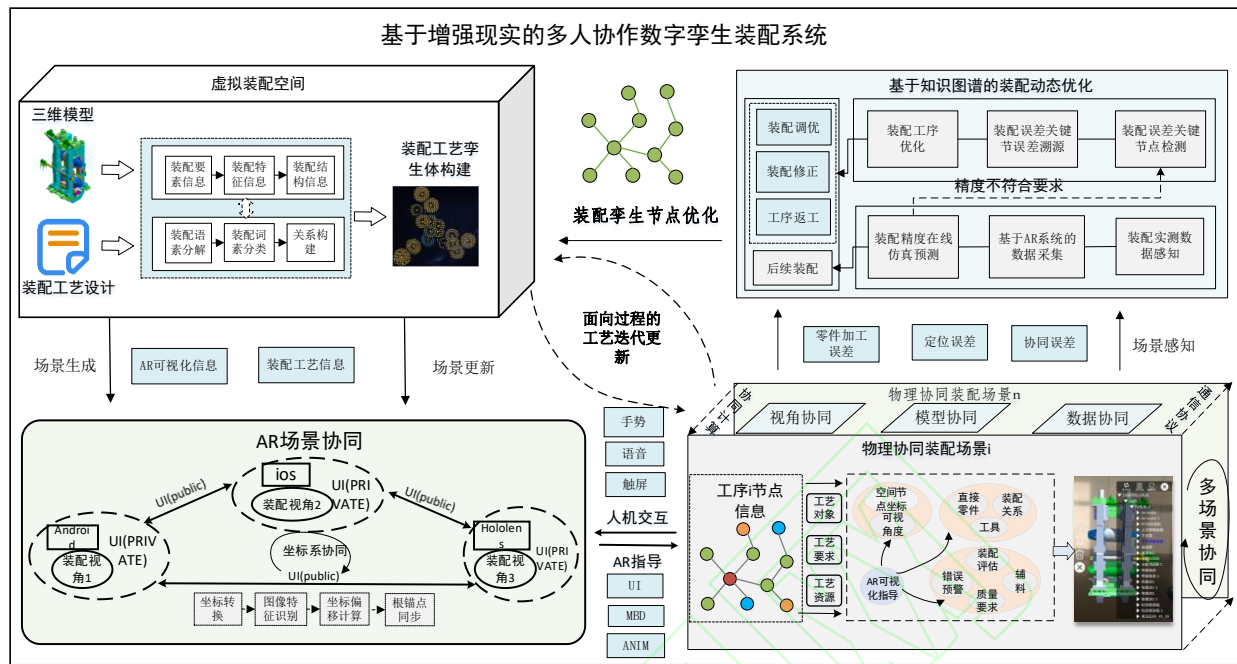


图7 基于增强现实的多人协作数字孪生装配系统架构

系统架构主要包含数字孪生体构建、AR 场景协同、面向过程的 AR 辅助装配、基于数据协作的装配动态优化四个部分。整个系统通过闭环的装配控制，保证装配质量的稳定性和装配效率。下文以某钢厂轧机的装配过程为例展开分析，从四个方面对本文方法进行验证。

4.1. 装配数字孪生管理平台的构建

数字孪生管理平台的构建主要是为装配过程提供数据服务，包括装配工艺信息的存储表达，AR 资源的定义与存储，及协同算法服务的集成。首先，根据轧机的装配工艺构建其装配工艺知识图谱，通过装配对象的数字孪生体和本体关系来获取装配节点的装配精度信息和装配关系，进而计算装配误差，实现对现场装配信息的迭代更新。装配工艺信息的数字孪生本体关系如图8所示，本体关系包含装配工序到工步，装配工步到装配要素、装配特征、装配要求，即装配过程的全要素信息。

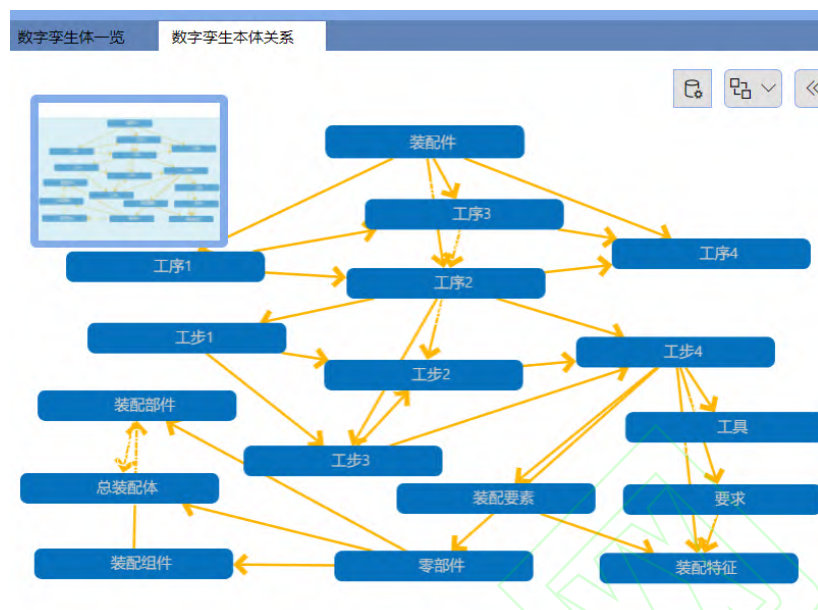


图8装配工艺的数字孪生本体关系

装配级孪生体管理了装配工艺的基本信息，对象级孪生体则管理了其基本属性信息。如图9所示，属性信息包括AR可视化信息和算法接口。可视化信息主要有装配对象模型，装配工艺信息；算法接口提供协同计算的算法，用于装配的协同计算过程。

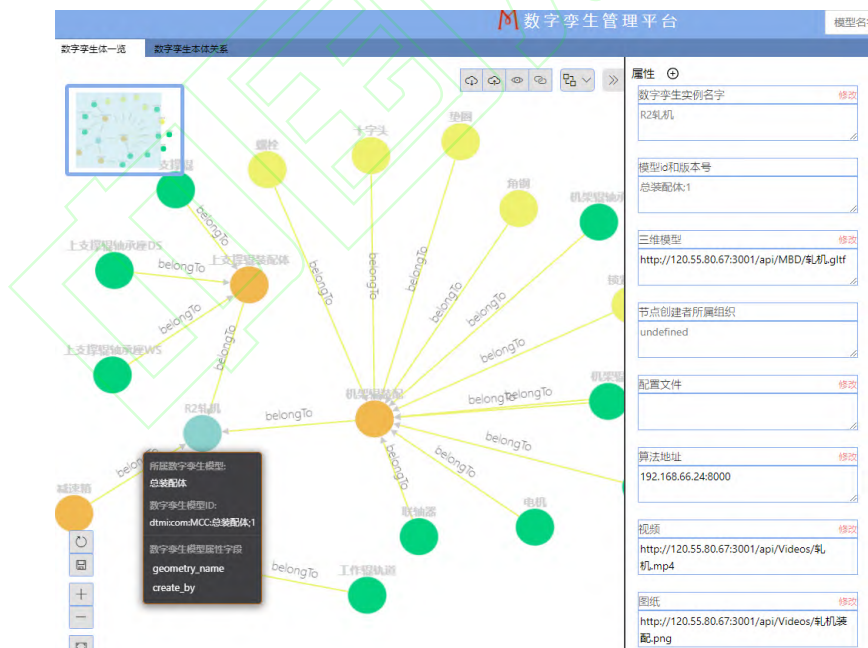


图9装配工艺数字孪生体知识表达

考虑现场装配工况，基于数字孪生平台获取资源，能够实现AR指导场景在线渲染，进行自适应的AR场景构建，实现对装配对象，装配参数，装配工具等的可视化，降低员工认知负担，提高装配效率。

4.2. 装配过程的数据协同

基于数字孪生平台能够对装配过程进行数据协同管理，为了对数据协作进行更好的表达，本节从产品层级和工序层级对轧机装配进行了可视化，如图 10 所示。

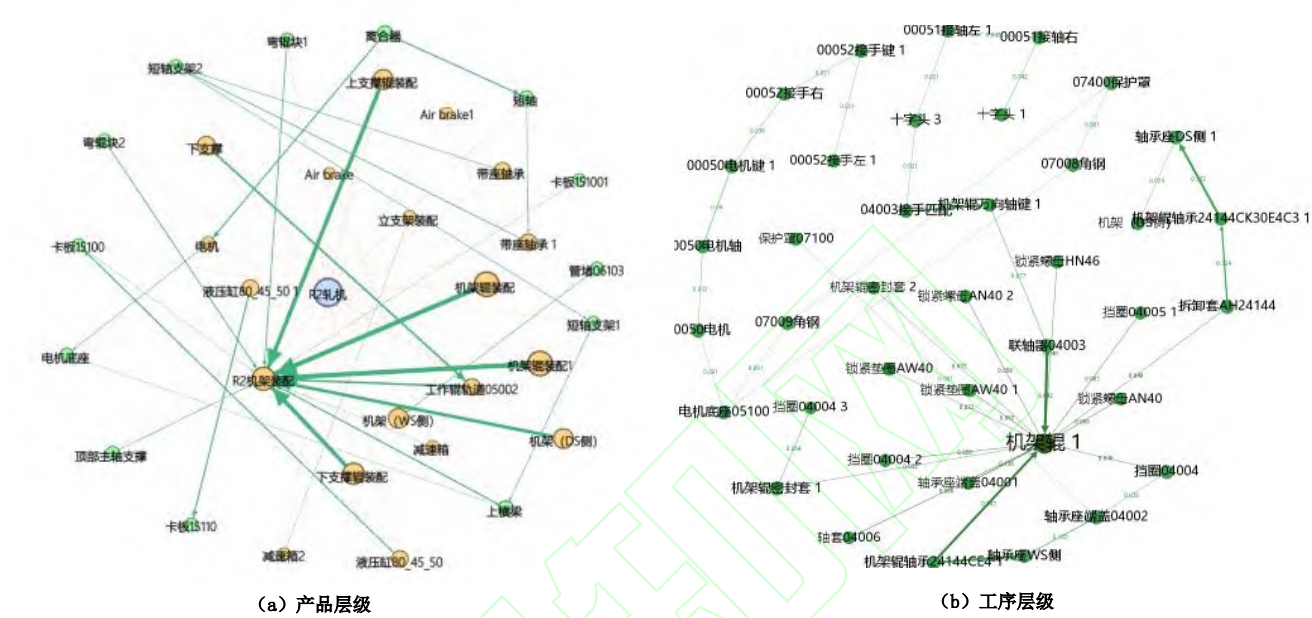


图10 轧机多阶段装配过程的偏差传递知识图谱

产品层级的知识表达主要为满足自上而下的数字孪生装配管理，对装配过程进行高效的把控和调整。如图 10(a)所示，节点的不同颜色表达了从零件到部件最后到产品的装配生命周期，节点的大小表达对整个产品装配质量的影响权重，基于孪生体的工艺规划数据和实际装配数据能够对不同管理需求进行调整。橙色的边可视化了产品的组成，绿色的边表达节点的装配关系和装配误差传递的权重，图中凸显表达了轧机是将机架作为装配基础进行装配的，而机架辊和支撑辊的装配是影响装配质量的主要因素。基于实际装配参数和公式 11 能够对装配累计误差进行计算，并对关键装配节点进行参数优化，进而影响物理协同的装配过程。

基于产品层级的知识图谱能够实现多工位的数据协同，基于工序层级的知识图谱能够对单工位协同装配进行监控和管理。如图 10（b）所示的轧机机架辊装配工序知识图谱表达，节点之间的影响权重和基于机架辊的节点波动系数分别用边的粗细和节点大小表达，能够发现装配工序的关键点为联轴器及机架辊的装配。同时，基于已有的知识图谱信息能够调用不同的算法接口进行不同场景的处理，实现数字孪生装配平台对装配环境的自适应性。

4.3. AR 场景协同

AR场景协同主要为多人协同装配提供共享的AR空间，本文基于手机和HoloLens眼镜进行了轧机协同装配的实验。将手机端作为协同基准，基于Vuforia进行图像跟踪实现HoloLens与手机的根锚点同步。考虑特征识别图对协同精度的影响，为了提高协同精度，采取特征明显的识别图作为跟踪目标，并对其进行旋转，缩放测试。协同精度的标准是根锚点的对齐度，然而多个AR空间的根锚点虽然具有相同的物理坐标但其世界坐标值却是不同的，无法进行对比。为此，在根锚点同步过程中将特征识别图的物理尺寸发送到协同设备，通过对比识别图的真实尺寸和图像跟踪获取的尺寸信息来对协同精度进行间接表达。

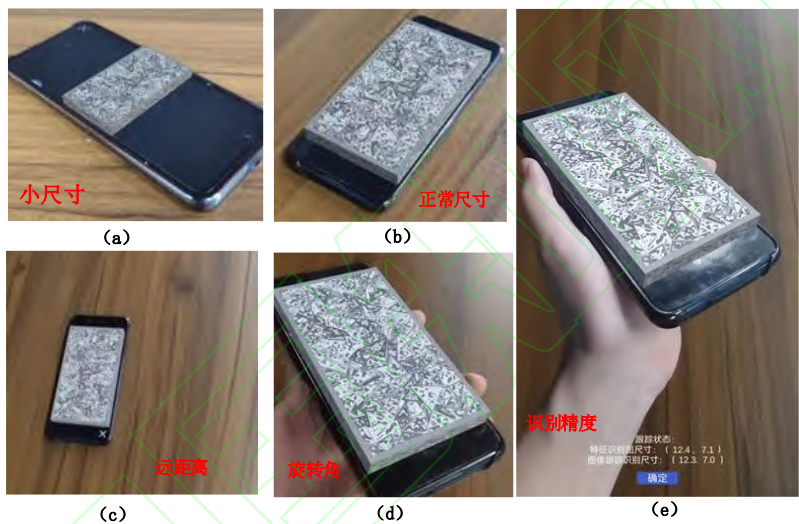


图11 根锚点协同过程

如图 11 所示，根锚点协同过程中，在不同尺寸，距离，旋转角度下进行特征识别图进行跟踪显示，能够对协同点的坐标进行准确跟踪，跟踪的平移误差约为 1 mm，平均旋转误差小于 0.5°，这为后续协同装配提供了可靠的指导环境。

协同坐标下装配场景的多视角可视化效果如图 12 所示，包含手机 AR 视角和 HoloLensAR 视角协同的可视效果。协同空间的 AR 资源分为私有信息、公有信息和关联信息。实验过程中，由于装配对象为轧机的上支撑辊，所以所有员工都需要看到装配基准部件，即轧机本体，因此它被作为公有资源，协同空间下轧机本体在物理空间具有相同的空间坐标，这也提供装配过程的视角协同。由于协同过程每个人的装配任务是不同的，所以针对不同的装配任务可视化的 AR 资源是私有的。如图所示，AR 空间下的任务面板针对不同员工其可视化信息不同。上支撑辊的 MBD 可视化资源，作为装配对象，虽然所有人都关注，但不同员工的关注重点不同，为了让每个员工对装配对象有一个

全面的观察，属性被设置为私有，可通过人机交互对模型进行平移旋转操作，对装配对象进行充分的认识。

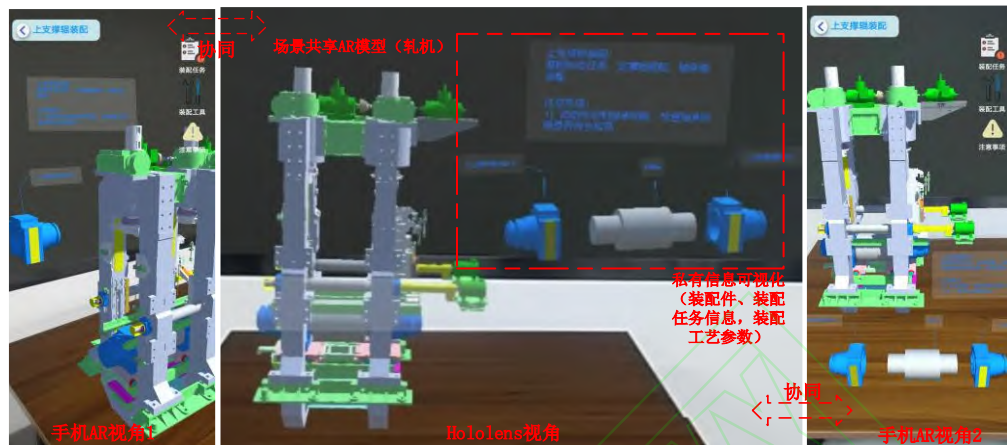


图12 AR场景协同可辅助装配过程

4.4. 物理装配过程协同

本节将通过现场轧机的装配实验进行分析，如图 13（a）所示，员工到达实际轧机装配工位，需要在多人协同的条件下实现对轧机的上支撑辊的装配，装配对象尺寸较大，装配环境复杂，操作人员对现场信息获取困难。如图 13（b）所示，操作员通过绑定数字孪生装配平台可获取装配节点信息，节点信息主要包含协同装配任务和装配资源，用于辅助装配过程。如图 13（c）所示，操作员可对装配资源的三维模型和图纸等信息进行 AR 可视化。



(a)

(b)

(c)

图13 基于数字孪生平台的装配资源获取

针对上支撑辊的装配任务，依赖于多个人的任务协同，协同过程如图 14 所示，不同装配人员针对协同装配任务，通过不同的可视角度进行装配任务的认知。图 14（a）中操作员 A 主要进行协助

装配，装配任务为三方确认，装配调优，需要对装配基准进行可视化，通过装配视角能够了解轧机的模型结构。由于是协同装配任务，轧机装配基准模型作为共有资源其属性被设为 Public, 操作员 B 和 C 能够在共享 AR 空间中观察操作员 A 所加载的轧机模型进行任务协同。图 14（b）中操作员 B 为主装配员，装配任务为上支撑辊的装配。在共享 AR 场景中，通过装配视角能够加载装配模型动画演示，了解装配细节。图 14（c）中操作员 C，装配任务为装配精度测试和辅助任务的完成，操作员能够从不同视角了解待装配对象的 MBD 模型，了解装配参数详情。由于任务的不同，支撑辊的模型属性被设为 Private, 操作员 C 对上支撑辊的交互操作不会影响操作员 B 的装配动画展示。同时，操作员能够通过交互的方式将实际装配信息上传来实现装配工艺的迭代更新，并通过 AR 系统反馈给装配人员。

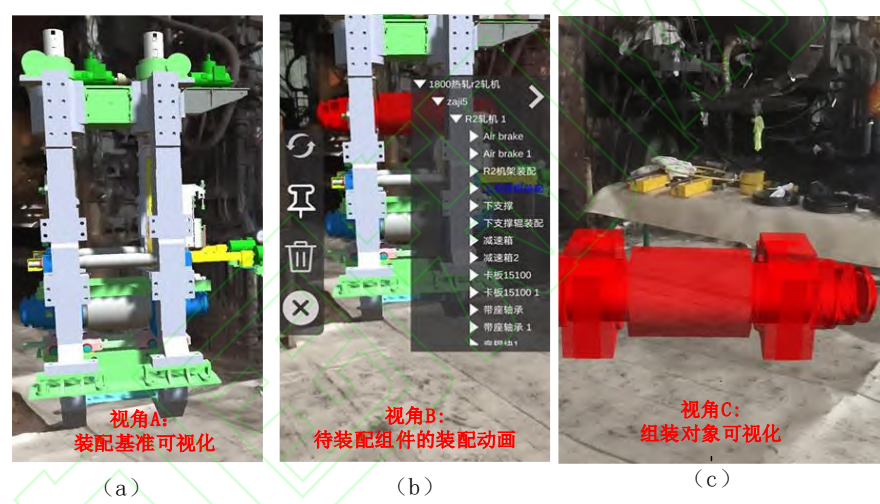


图14 基于数字孪生的AR现场多人协同装配

为了验证协同装配效率，邀请其他装配件的装配员工分两组分别进行了 20 次装配实验，以上支撑辊熟练装配员工的装配为标准，分别统计了装配准备、装配完成和装配记录等参数的统计，如表 1 所示。

表 1 不同装配类别装配效率对比

装配类别	预准备效率	装配流畅度	装配协作效率	装配特殊环节完成度	装配合格率	装配完成效率	装配工艺记录效率
熟练员工协同装配	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
新员工协同装配	45%	45%	40%	80%	65%	30%	70%
新员工AR协同装配	90%	80%	85%	100%	95%	85%	160%

新员工通过传统的流程和方式执行装配任务，在装配准备工作上和装配记录上耗费大量的时间，虽然装配合格率在 50%以上，但是装配效率却无法满

配，以数字孪生和 AR 技术为支撑，在各个方面都有较好的表现。在 AR 的协同场景下，新员工的装配协作效率是传统装配的两倍，能够实现新团队的快速磨合。依赖于 AR 的装配引导和预警，装配合格率达到 95%，保证了产品质量稳定性；在装配特殊环节，例如给轴承座填充油脂等细节任务能够实现 100% 完成。同时，AR 的数据交互消除了物理空间与孪生空间的沟通障碍，装配过程中工艺信息记录的效率甚至高于熟练员工的效率。对比可知，基于数字孪生的 AR 协同装配指导能够极大的降低员工认知负担，同时提升装配质量稳定性和整体装配效率。

5. 结束语

为了提升多人协作装配的质量和效率，同时提升装配系统的场景自适应性，本文将 AR 和数字孪生技术运用于复杂产品的协同装配。首先构建了基于数字孪生的 AR 协作装配体系架构，其次，建立了面向过程的装配工艺知识图谱，并重点研究了基于根锚点的多场景坐标协同方法和基于知识图谱的装配过程数据协作，实现了 AR 环境下的高效协同装配。最后，通过多个实验验证了该方法的有效性。本文的主要贡献如下：

- 1) 基于根锚点的 AR 场景协同具有足够的鲁棒性和稳定性，装配人员能与他人共享基于自身位置和方向调整的共同视觉导向，提高了对协同装配任务的直观感知。
- 2) AR 协同装配的信息可视化表达在降低员工认知负担的同时极大提高员工的协同效率。
- 3) 依赖装配工艺知识图谱的知识支持能够实现 AR 场景的实时构建，提升系统的工况自适应性。
- 4) 数字孪生的虚实融合实现了装配过程的工艺的迭代与优化，提高了装配产品的质量稳定性。

本文工作尚存在不足，AR 协同装配需要根据环境进行装配任务选择后进行开展，对于任务感知能力不足。未来可能基于图像识别技术对物理场景的理解展开研究，进一步提升装配过程的智能化。

参考文献

- [1] DANIELSSON O, SYBERFELDT A, HOLM M, et al. Operators perspective on augmented reality as a support tool in engine assembly[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 72:45-50.
- [2] QIU C, ZHOU S, LIU Z Y, et al. Digital assembly technology based on augmented reality and digital twins: a review[J]. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2019. 1(6): 597-610.
- [3] FRAGA-LAMAS P, FERNANDEZ-CARAMES T M, BLANCO-NOVOA O, et al. A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard[J]. *IEEE Access*, 2018, 6:13358-13375.
- [4] QIQ, TAO F, HU T, et al, Enabling technologies and tools for digital twin[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 3-21.
- [5] ZHENG Shouguo, ZHANG Yongde, XIE Wentian, et al. Modeling of aircraft assembly line based on digital twin[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(05):843-854. [郑守国, 张勇德, 谢文添, 樊虎, 王青. 基于数字孪生的飞机总装生产线建模[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(05):843-854.]
- [6] ZHANG Y, HUANG J, LIU X, et al. Digital Twin-Based Process Optimization System Research for Micro-Assembly Products[C]. in *2021 International Conference on Computer, Control and Robotics, ICCCR 2021*, 2021:133-137.

-
- [7] SUN X, BAO J, LI J, et al, A digital twin-driven approach for the assembly-commissioning of high precision products[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020. 61.
- [8] ZHUANG C, GONG J, LIU J, Digital twin-based assembly data management and process traceability for complex products. Journal of Manufacturing Systems, 2021. 58: p. 118-131.
- [9] LI Wang, WANG Junfeng, LAN Shan, et al. Augmented Reality Assembly Process Information Content Editing Technology[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(07): 1676-1684 (In Chinese). [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(07): 1676-1684.]
- [10] WANG Yue, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang. 3D Tracking Registration Method for Augmented Reality Assembly System With Point Cloud and Visual Feature Fusion[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(01): 143-151 (In Chinese). [王月, 张树生, 白晓亮. 点云和视觉特征融合的增强现实装配系统三维跟踪注册方法[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(01): 143-151.]
- [11] ZHANG Haopeng, GUO Yu, TANG Pengzhou, et al. Tracking Registration Method of Augmented Reality Assembly System Based on Image Matching[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2021, 27(05): 1281-1291 (In Chinese). [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, 2021, 27(05): 1281-1291.]
- [12] LI, S., ZHENG P, ZHENG L, An AR-Assisted Deep Learning-Based Approach for Automatic Inspection of Aviation Connectors[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021. 17(3): 1721-1731.
- [13] CHIEW J.H, SUNG A.N, Augmented reality application for laptop assembly with assembly complexity study[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022.
- [14] LAVIOLA E, GATTULLO M, MANGHISI V, et al. Minimal AR: visual asset optimization for the authoring of augmented reality work instructions in manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022. 119(3-4): p. 1769-1784.
- [15] FENG S, HE W, ZHANG S, et al, Seeing is believing: AR-assisted blind area assembly to support hand-eye coordination[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022.
- [16] FU M, FANG W, GAO S, et al., Edge computing-driven scene-aware intelligent augmented reality assembly[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022.
- [17] MAKRI S, KARAGIANNIS P, KOUKAS S, et al., Augmented reality system for operator support in human-robot collaborative assembly[J]. CIRP Annals, 2016. 65(1): 61-64.
- [18] VANNESTE P, HUANG Y, PARK J.Y, et al, et al., Cognitive support for assembly operations by means of augmented reality: an exploratory study[J]. International Journal of Human Computer Studies, 2020. 143.
- [19] HU Yong, WEI Naikun, WU Dianliang, et al. Assembly Design System Based on Collaborative Virtual Environment[J]. Computer Engineering, 2010, 36(12): 13-16 (In Chinese). [胡勇, 韦乃琨, 武殿梁, 等. 基于协同虚拟环境的装配设计系统[J]. 计算机工程, 2010, 36(12): 13-16.]
- [20] ZHOU Sihang, LIU Zhenyu, TAN Jianrong. Remote Collaborative Virtual Assembly Conflict Elimination Based on Intelligent Understanding[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2012, 18(04): 738-746 (In Chinese). [周思杭, 刘振宇, 谭建荣. 基于智能理解的异地协同虚拟装配冲突消解[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(04): 738-746.]
- [21] ZHANG Libin, LV Huanpei, XU Fang, et al. Modeling and Optimization of CPN Collaborative Assembly Task for Low-Voltage Electrical Appliances[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2020, 26(07): 1737-1748 (In Chinese). [张立彬, 吕焕培, 胥芳, 等. 面向低压电器的 CPN 协同装配任务建模与优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(07): 1737-1748.]
- [22] ZHANG R, LV Q, LI J, et al, A reinforcement learning method for human-robot collaboration in assembly tasks[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022. 73: 102227.
- [23] LV Q B, ZHANG R, SUN X M, et al, A digital twin-driven human-robot collaborative assembly approach in the wake of COVID-19. Journal of Manufacturing Systems, 2021. 60: 837-851.
- [24] CHEN Zhiyu, BAO Jinsong, ZHENG Xiaohu, et al. Assembly Process Semantic Recognition Method Based on Long short-term memory network[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2021, 27(06): 1582-1593 (In Chinese). [陈治宇, 鲍劲松, 郑小虎, 等. 基于长短期记忆网络的装配工艺语义识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(06): 1582-1593.]
- [25] YI Yang, FENG Jindan, LIU Jinshan, et al. Digital twin assembly model expression and accuracy prediction of complex products[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2021, 27(02): 617-630. (In

Chinese)[易扬,冯锦丹,刘金山,等.复杂产品数字孪生装配模型表达与精度预测[J].计算机集成制造系统,2021,27(02):617-630.]

[26] Zhu Peng,Yu Jianbo,Zheng Xiaoyun,et al. Modeling and Error Traceability of Deviation Transfer Network in Mechanical Assembly Process[J].Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2019,53(08):1582-1593. (In Chinese)[祝鹏,余建波,郑小云,等.机械装配过程的偏差传递网络建模与误差溯源[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(08):1582-1593.]

作者简介:

丁志昆(1998-),男,江西抚州人,硕士研究生,研究方向:增强现实、数字孪生、知识图谱、数字化装配, E-mail: 13262652293@163.com;

孙奕程(1996-),男,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向:数字孪生、知识图谱, E-mail: 2200972@mail.dhu.edu.cn;

段亮亮(1999-),男,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向:数字化装配、增强现实、计算机视觉, E-mail: qingxixiliu@163.com;

刘世民(1994-),男,江苏盐城人,博士研究生,研究方向:数字孪生、数字化加工, E-mail: 1182021@mail.dhu.edu.cn;

+鲍劲松(1972-),男,安徽庐江人,教授,博士,研究方向:工业智能、智能制造,通讯作者, E-mail: bao@dhu.edu.cn。