

# 现场实时数据驱动的翼身制孔过程三维可视化监视研究

王峻峰<sup>1</sup>, 刘锐<sup>2</sup>, 谢敏<sup>1</sup>, 郭洪杰<sup>3</sup>, 徐石磊<sup>4</sup>, 张书生<sup>4</sup>, 李世其<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074;

2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610073;

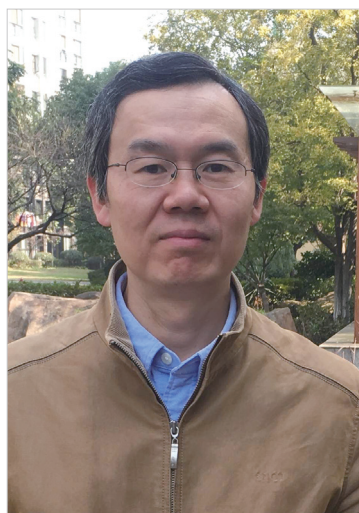
3. 航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110034;

4. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

**[摘要]** 针对飞机大部件数字化柔性装配过程, 面向制孔现场局部区域开敞性差、人工观察视角受限、制孔过程信息可视化程度不高等问题, 提出了一种现场数据驱动的翼身制孔过程三维实时可视化监视方案。提出了面向现场可视化监视的制孔系统数据集, 描述了虚实制孔场景的数据集成流程, 根据实际需求给出了三维视角管理和孔位特征实时可视化生成的实现方法。基于 CATIA 平台开发实现了制孔过程三维可视化现场监视原型系统, 该系统通过建立与现场设备服务器的连接, 实时获取制孔过程数据, 能够直观、动态、多维地展现实际制孔过程, 提高对飞机大部件制孔过程的现场监视能力。

**关键词:** 数据驱动; 翼身制孔; 三维可视化; 现场监视; CATIA; 飞机装配; 智能制造

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.036



王峻峰

博士、教授、博士生导师, 现任华中科技大学工业及制造系统工程系主任。主要研究方向为生产与服务系统工程、数字化智能化装配与维护、虚拟/增强现实技术及制造应用等。主持和参与了多项国家级、省部级、国际合作和企业合作项目。

采用数字化和柔性化的自动制孔技术能够有效提高飞机制孔质量和装配效率<sup>[1]</sup>。飞机装配现场不同于普通的生产工位, 产品和设备尺寸大、局部区域开敞性差、自动化制孔工作过程状态不易获知。对于现场操作和管理人员, 直观有效的信息显示与三维可视化平台, 有利于工作人员及时了解实际制孔生产过程与状态, 从而提高对制孔过程的感知和对生产现场的控制能力, 是飞机智能制造的重要组成部分。

随着计算机与网络通信技术的发展, 基于三维模型的装配现场信息可视化技术得到广泛应用。Autodesk 针对工业装配现场提出了可交互的三维工艺可视化方法<sup>[2]</sup>, 北京航空航天大学利用无线网络, 通过移动终端实时展现装配信息<sup>[3]</sup>。合肥工业大学建立了装配执行过程着色 Petri 网模型, 实现车间装配数据的有效

追溯和全程监控<sup>[4]</sup>。尹超等<sup>[5]</sup>利用 Flexsim 软件开发了加工车间三维可视化动态监控系统, 能够动态反映生产进度和零部件加工等信息。贾宪水<sup>[6]</sup>和张翰方<sup>[7]</sup>利用 HOOPS 图形开发平台, 分别针对飞机翼身对接与制孔现场过程的可视化, 开发了柔性装配过程三维集成可视化系统。现有研究尚存在以下问题:(1) 侧重于工艺过程和生产管理等信息的可视化, 缺少生产过程装备运行和工作过程的三维实时可视化;(2) 可视化监视的多维性、交互性和实时性有待提高;(3) 基于通用 HOOPS 图形平台的系统增加了模型处理的难度和时间。本文根据飞机翼身制孔过程的现场监视需求, 利用制孔设备实时运行数据, 驱动三维可视化场景, 真实地在线复原制孔工作过程, 实现制孔过程数据的集成管理、实际制孔过程的实时监视与回放追溯等功能, 为飞

机大部件装配过程提供实时、准确、高效的可视化信息感知与监视手段。

## 数据驱动的翼身制孔三维集成可视化监视总体方案

基于数字孪生体<sup>[8-9]</sup> (Digital Twin) 思想,本文构建了现场数据驱动的翼身制孔三维集成可视化监视系统的总体方案,以便真实地在线展现翼身大部件的制孔过程,为现场工作人员提供直观的信息监视平台,提高对制孔过程的感知能力。如图1所示,总体方案由两大部分构成,即三维模型构成的虚拟制孔场景和实际设备及制孔对象构成的生产现场物理场景,两者间形成数字孪生关系。

在实际制孔现场的物理场景中,测量设备、工装设备和制孔设备在各自的控制系统下工作。测量系统通过三维坐标量的测量,实现对车间内制孔设备和制孔对象的高精度定位;工作人员基于刀尖点离线编程和仿真,预先生成制孔设备的NC指令,上传到数控系统中用于控制制孔设备运行。数控制孔设备由五坐标空间机构和末端执行器构成。工装的运动由工装系统控制,制孔过程中,避免与数控制孔设备发生干涉碰撞。设备在实际运行中产生的数据反馈回各个控制系统,这些数据将作为驱动虚拟场景的数据来源。

在虚拟场景中,工装和制孔设备等虚拟模型按照现场实际进行布局,并根据测量数据进行微调定位。通过事先建立可视化监视系统与现场设备控制系统服务器的网络连接,当现场设备运行时,设备位姿等数据实时传输至可视化监视系统中,基于建立的设备运动自由度关系,驱动虚拟三维场景的实时更新,实现对制孔过程的实时监控。预定义的关键视角方便工作人员快速定位当前的制孔区域;局部视图提供了以制孔设备末端为视点的实时放大场景,增强

了对制孔现场局部区域的观察手段;虚拟场景中文字类数据的实时显示为工作人员提供了制孔工作执行情况信息;直观的三维可视化运动场景真实展现了实际设备工作状态,实现了工作过程的实时在线监视和制孔结束后的制孔过程回放查看,为制孔工作质量回溯提供了新的手段。

## 现场数据驱动的三维可视化监视关键技术实现

为了实现与设计系统的无缝衔接和充分利用已有设计平台的强大能力,根据现场实际需求,本系统基于CATIA平台进行二次开发并运行在CATIA界面下。面向制孔过程三维可视化监视的数据建模、虚实场景的数据集成和三维可视化监视元素生成是该系统实现的关键。

### 1 面向制孔过程三维可视化监视的数据建模

飞机制造过程实质上是一个产品数字建模、数据传递、拓展和加工处理的过程。为了有效管理飞机制造全生命周期中的各类信息数据,提高产品质量并降低生产成本,波音公司提出SSPD(单一产品数据源)信

息管理思想<sup>[10]</sup>。它通过定义抽象数据模型,确保产品数据在设计、制造、维护等各个阶段的一致性、共享性和安全性。作为飞机制造过程中的重要环节,翼身制孔过程同样包含大量的数据信息,实际制孔工程数据主要有3个特点:数据量大、数据异构以及数据的动态与多维性。

本文以单一产品数据源中的三维产品数模为基础,面向制孔可视化监视的现场实际需求,按照制孔工作中的资源、工艺、监视和定位4个方面进行分类,建立了RPVC(Resource, Process, Visualization, Coordinate)数据集,用于制孔工作数据的组织与管理,如图2所示。制孔资源数据集包含了虚拟场景中三维数模,主要是待制孔的飞机大部件、数控设备、定位工装等模型数据。制孔定位数据集描述了虚拟场景与物理场景中坐标系关系,确保虚拟场景中运动的正确性。制孔工艺数据集包含了NC代码、工装运动、照相动作、设备状态与生产批次信息等,这些数据是由现场设备实际运行和生产要求产生的,形成了驱动可视化监视系统的输入信息。系统产生的可

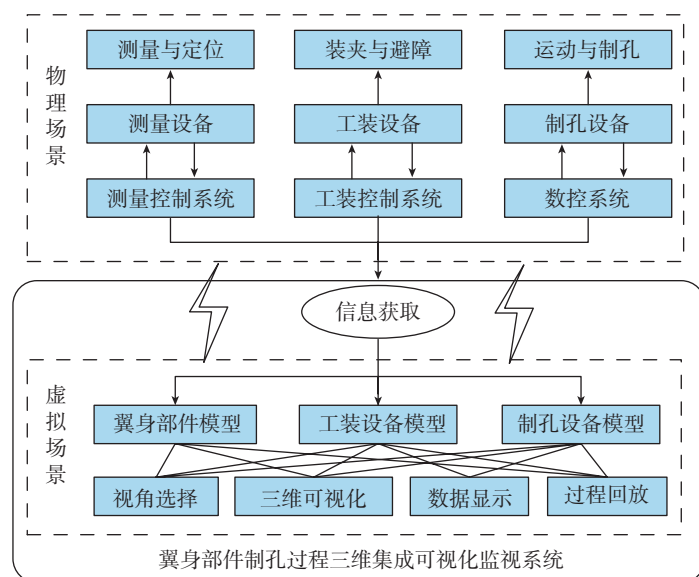


图1 数据驱动的翼身制孔三维集成可视化现场监视总体方案

Fig.1 Major components of integrated 3D visualization monitoring system for wing-body drilling

视化信息由监视特征数据集构成,包括了孔位生成数据、视角管理数据、辅助信息与运动信息等。

## 2 虚拟制孔场景和实际制孔场景的数据集成

制孔过程数据集成是实现虚实制孔场景交互,保证可视化监视系统实时、准确、稳定运行的关键。数据集成的过程包括了数据实时采集、数据解析与增值,以及数据驱动与存储等方面。

(1) 真实制孔过程数据的实时采集。本文可视化监视系统作为客户端,通过 TCP/IP 协议建立可视化监视系统与生产现场设备控制系统服务器的网络连接,设定间隔时间(如 200ms、300ms、500ms 等)获取工装运动信息和制孔设备运动信息。传递的数据包中,按照约定格式包括了各个自由度运动部件的空间位姿量、当前正在执行的 NC 代码文本等。

(2) 数据解析与增值。接收到的数据包按照约定格式进行解析,提取数控制孔设备各个自由度的空间位姿量或数控 NC 代码文本行。空间位姿量是现场设备实际执行的结果,而 NC 代码则是五坐标制孔设备的运动控制数据,也可以通过关键字提取并解析,经差值运算得到运动增量、运动方向、孔位信息等。

(3) 数据驱动与存储。解析后的实时数据将分配给虚拟场景中各个运动节点,完成相应的运动。通过定时器连续地获取数据并驱动虚拟场景,在虚拟场景中形成连续的三维可视化动作。这些数据同时将存储在本地数据库中,用于事后制孔过程回放和追溯。根据制孔工作特点,本文设计了数据库结构,如图 3 所示。可视化监视系统数据库按照不同生产批次进行划分,每一批次对应独立的数据库文件,每个数据库文件中数据表结构相同。

## 3 三维可视化关键监视元素的生成

### 3.1 三维监视视角的管理

生产车间现场制孔时,翼身大部件占据的空间大、制孔区域多、局部区域开放性较差,不易观察制孔设备运行过程和制孔工作情况。为了给用户更好的交互与监视能力,可视化监视系统提供了对三维虚拟场景中的视角管理功能,视角管理主要分为两部分:主视角切换与自定义局部视图表达。

在三维虚拟制孔场景中,设备运行范围大,虽然 CATIA 系统提供了视点切换功能,但不具有制孔应用的针对性。根据翼身大部件的实际制孔区域,在可视化监视系统中事先预

定义几个合理的观察视角,在系统运动过程中可以随时切换到任何一个主视角,便于该视角制孔过程的监视(图 4)。另外,主视角观察仅仅显示了固定位置的视野,为更好地动态跟踪制孔运行过程,本文采用局部视图的方法实现了放大视角的跟随运动,该局部视图能够实时跟随并显示从数控设备钻头所看到的画面,显示钻头的加工状态和孔位信息的产生过程(图 5)。局部视图画面中,孔位信息可以随时加载与隐藏。

### 3.2 面向制孔过程监视的孔位可视化表达

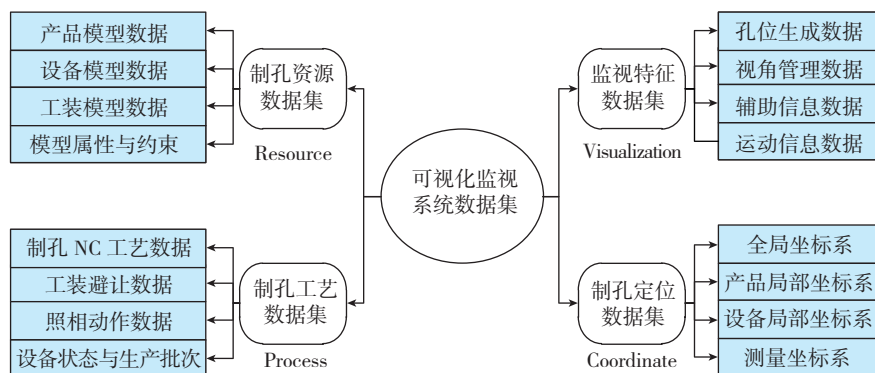


图2 制孔过程三维可视化监视系统数据集

Fig.2 Data set of drilling monitoring system based on 3D visualization

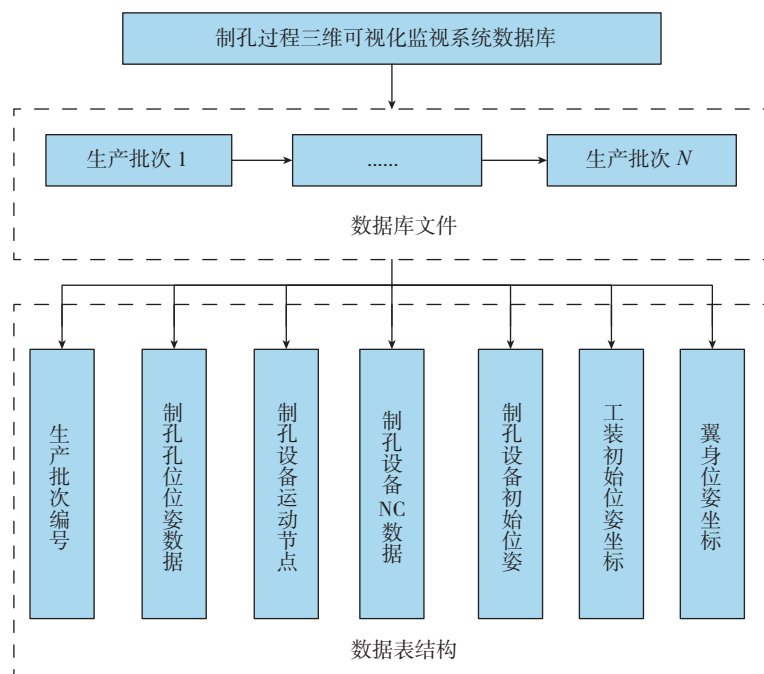


图3 三维可视化监视系统数据库结构

Fig.3 Database structure of monitoring system based on 3D visualization

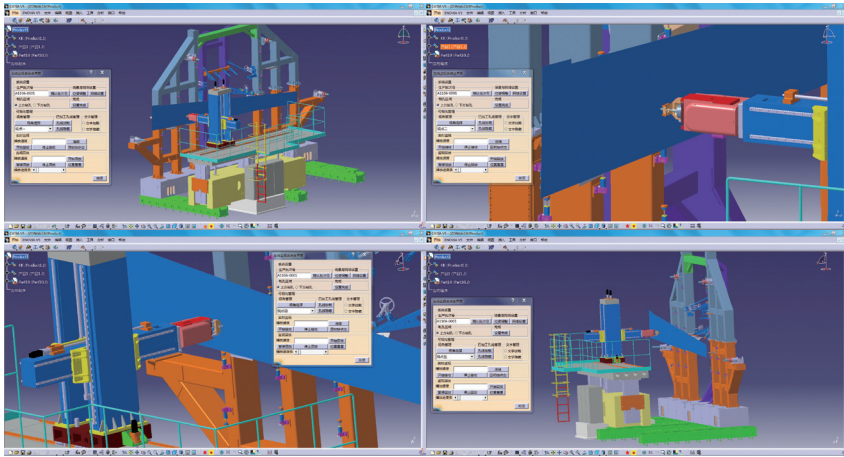


图4 预定义的主视角示例图

Fig.4 Case of pre-defined main view



图5 自定义局部视图示例

Fig.5 Case of user defined local view

翼身部件具有数千个孔位,制孔进度表达(即哪些孔已完成、哪些孔未完成)是监视系统中一个重要的可视化特征。可视化监视场景中需要能够实时显示当前正在制孔的位姿信息和已制孔的位姿信息,尽管翼身 MBD 模型中已标注了孔位信息,但并没有形成孔位的实体模型,需要在实际制孔过程中实时生成这些孔位的可视化特征,用于监视制孔进度情况。

在三维虚拟场景中表示孔特征常用的方法有布尔运算法和轨迹跟踪法。由于三维场景中使用实体模型,实际制孔数量庞大,布尔算法运算量大,且制孔过程要不断生成孔位的场景树,增加了场景树管理的难度,也进一步加大了场景的模型量。为了不影响系统的运行效率,本文采用轨迹跟踪法实时生成孔位的可视化特征,以孔的轴线代表孔位的位姿

信息,实现孔位生成的可视化。

轨迹跟踪法的实现流程如图 6 所示,具体过程为:根据各个运动节点的运动增量,按照预先定义的自由度约束关系驱动五坐标制孔设备进行协调运动,将制孔末端送至制孔位置,然后制孔钻头做平移运动完成制孔动作,并显示孔位轴线。该过程中,钻头在三维空间生成直线段,该直线段位于真实孔的中心轴线处。CAA API 提供了一组图形基元(Graphic Primitive)来表达空间的点、线、面、体等信息。CAT3DLineGP 类用来管理 3D 线图元,它是一种临时线,不属于当前文档的一部分,且不被加载到产品结构树中。这样的属性方便了孔位信息的管理。实际生产过程中,当制孔任务不能一次性完成,需要关机重新工作时,为了在下次制孔时能够在可视化系统中显示出当前已制孔任务,可以通过访问本地数据库,采用系统的回放功能,将已制的孔位信息显示在可视化场景中(图 7),然后开始新的制孔工作。

## 原型系统开发与应用

### 1 翼身制孔三维可视化监视系统架构设计

现场数据驱动的翼身制孔三维可视化监视系统架构如图 8 所示,采用 CATIA 环境搭建虚拟制孔场景,

利用 CAA 二次开发技术进行系统集成。主程序框架采用插件式管理,各功能模块以插件形式加载。场景模型采用 CATIA 产品实体模型,在载入可视化监视系统后进行场景布局,通过场景树重建实现设备的自由度关系定义,实现与真实场景的正确映射关系,并保存新的模型文件。模型文件与数据库文件共同构成了 RPVC 数据集。

现场制孔工作开始前,系统要先通过网络建立与现场数控系统和工装系统服务器的连接,同时从两个服务器接收数据。对接收到的数据进行解析,一方面用于驱动三维虚拟场

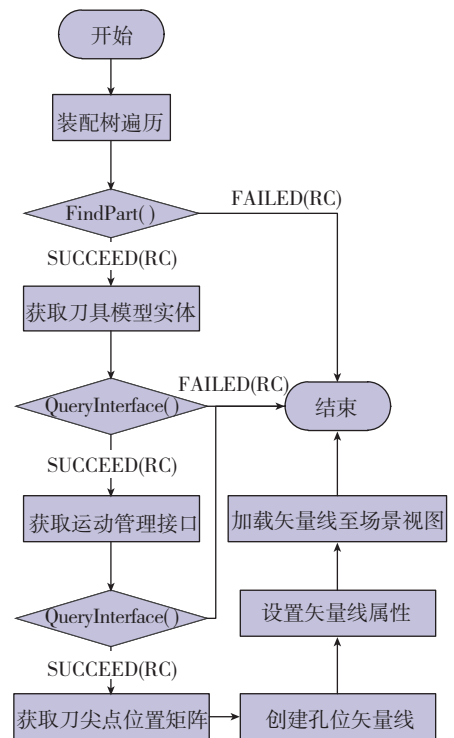


图6 轨迹跟踪法孔位信息生成流程

Fig.6 Drilling hole data generation flow of trajectory tracking method



图7 孔位信息示例

Fig.7 Case of drilling hole data

景的模型运动;另一方面实时存储在本地数据库,用于监视过程的回放。利用该可视化监视系统,能够以三维形式直观地展现现场的制孔过程,实时显示设备的运动、孔位信息的生成等;同时也可以以文字形式展示制孔过程重要的工艺数据信息。

## 2 系统功能初步实现与工作流程

采用 CAA 开发时,新建“可视化监视”工作台(workbench),该工作台主要包含了主界面模块、局部视图模块、位姿调整模块等。系统运行时的主界面如图 9 所示。系统主要模块的介绍如下。

(1)主界面模块:是用户交互主界面,在数据驱动系统运行前,用户进行本批次生产设置,如调整和保存场景位姿、选择生产批次和制孔区域等。在开始实时监视前,建立与现场设备控制系统间的 TCP/IP 连接。在制孔结束后,可选择进行制孔过程回放,回放的过程可以随时暂停或开始。系统运行过程中,可以随时在主界面中加载实时获取的现场生产数据信息,如当前制孔位的三维坐标或者其他需要显示的文本信息。

(2)局部视图模块:在系统运行时可以随时加载或者关闭。布局视图能够动态跟踪从钻头视角看到的局部虚拟场景,显示设备运行状态和

制孔过程。局部视图中的孔位信息可以随时加载或者隐藏。

(3)位姿调整模块:为了适应生产现场设备和不同批次产品实际位置的变动,利用定位模块、根据测量数据调整虚拟场景中模型的位姿,在系统运行开始前完成对虚拟模型的调整定位,实现虚拟制孔场景与真实制孔场景的正确映射关系。

可视化监视系统的工作流程如下:

(1)进入 CATIA “可视化监视”工作台,读入翼身制孔场景三维数字化模型。对场景中运动部件建立空间约束关系,利用现场的实际测量数据在定位模块中调整虚拟场景中的设备模型和工装模型的初始位置,并保存场景初始位姿信息。

(2)选择当前生产批次和制孔区域。如果是新批次生产,则系统自动生成该批次生产对应的数据库文件,便于监视过程生产数据存储。然后建立可视化监视系统与现场工装控制系统和数控系统的网络连接,并将可视化监视系统设置为数据接收等待状态。

(3)现场服务器段发送数据后,可视化监视系统数据采集模块进行数据的接收、解析。解析后的数据一方面用于虚拟模型驱动,另一方面会

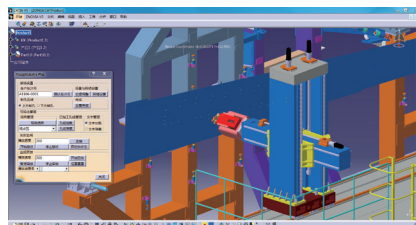


图9 翼身制孔三维可视化现场监视系统主界面  
Fig.9 Interface of wing-body drilling monitoring system based on 3D onsite visualization

实时保存在当前批次的数据库文件中。接收的现场数据信息可以显示在三维场景中。

(4)系统运行过程中,可以对全局视图和局部视图进行操作,方便及时地对制孔过程进行有效监视。通过选择预定义观察区域调整全局视角,局部视图在系统运行过程中可以随时加载。

(5)物理设备停止工作、可视化监视系统工作结束后,系统数据库文件完整保存了该次制孔过程的数据信息。通过本地数据库的访问实现制孔过程回放。系统能够实现回放过程的开始、暂停、快速回放等功能,并区分已加工孔和未加工孔,方便用户进行交互操作。

该系统是在前期工作基础上的深化和根据现场需求的进一步定制开发<sup>[6-7]</sup>。本文的关键技术在 HOOPS 图形平台下的可视化监视系统已在现场翼身制孔中得到验证,通过连接现场设备的西门子控制系统,能够流畅地驱动场景实现可视化监视。本文以 CATIA 平台二次开发的系统,采用前期采集的现场数据,通过连接局域网内建立的模拟服务器进行了初步试验,同样能够实现流畅的可视化监视,初步证明了本文技术在 CATIA 平台下的可行性。

## 结论

现场的实时感知是实现智能制造的重要环节,基于数字孪生体思想,本文提出了翼身制孔过程三维可

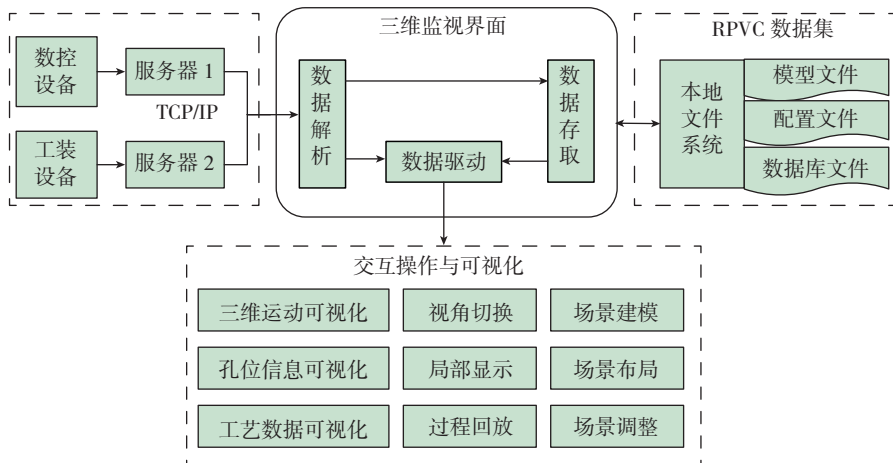


图8 数据驱动的翼身制孔三维可视化现场监视系统架构  
Fig.8 Structure of data driven wing-body drilling monitoring system based on 3D onsite visualization

视化现场监视方案。面向可视化现场监视需求,建立了制孔监视系统的数据集;给出了虚拟制孔场景和实际制孔场景的数据集成方式,详细描述了三维虚拟场景中的视角管理和孔位生成方法,基于CATIA平台开发了现场数据驱动的翼身制孔三维可视化监视系统,通过制孔现场实时采集的数据,验证了技术的可行性与有效性,具有较好的应用前景。

### 参考文献

- [1] 韦红余, 陈文亮, 蒋红宇, 等. 面向现代飞机装配的长寿命机械连接技术[J]. 航空制造技术, 2009, 52(17): 34-37.
- WEI Hongyu, CHEN Wenliang, JIANG Hongyu, et al. Long-life mechanical connecting technology for modern aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(17): 34-37.
- [2] WANG Q H, LI J R. Interactive visualization of complex dynamic virtual environments for industrial assemblies[J]. Computers in Industry, 2006, 57(4): 366-377.
- [3] 王帅, 孙占磊, 张承阳, 等. 基于移动终端的飞机装配现场工艺可视化系统[J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 58-62.
- WANG Shuai, SUN Zhanlei, ZHANG Chengyang, et al. System of aircraft assembly process visualization based on mobile terminals[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 58-62.
- [4] 凤俊杰. 面向汽车发动机装配过程建模与监视方法研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(6): 68-71.
- FENG Junjie. Research on modeling and monitoring methods for automobile engine assembly process [J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(6): 68-71.
- [5] 尹超, 张飞, 李孝斌, 等. 多品种小批量机加车间生产任务执行情况可视化动态监控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 46-54.
- YIN Chao, ZHANG Fei, LI Xiaobin, et al. Visualization dynamic monitoring system of production execution for multi-variety and small-batch job shop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(1): 46-54.
- [6] 贾宪水. 现场数据驱动的飞机翼身对接可视化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- JIA Xianshui. On-site data-driven visualization of aircraft wing-body docking[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [7] 张瀚方. 飞机机翼制孔现场可视化技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- ZHANG Hanfang. Research on on-site visualization technology of aircraft wing drilling[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [8] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles[C]//Proceeding of the 53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin. Honolulu, 2012.
- [9] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, 2011: 1687-5966.
- [10] HE L N, MING X G, KONG F B, et al. Research on airplane BOM management based on single source of product data[C]//Proceeding of 3rd International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. Paris, 2012.

通讯作者: 王峻峰, E-mail: wangjf@mail.hust.edu.cn.

## Research on Onsite Real Time Data Driven 3D Visualization Monitoring of Aircraft Wing-Body Drilling Process

WANG Junfeng<sup>1</sup>, LIU Rui<sup>2</sup>, XIE Min<sup>1</sup>, GUO Hongjie<sup>3</sup>, XU Shilei<sup>4</sup>, ZHANG Shusheng<sup>4</sup>, LI Shiqi<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610073, China;

3. AVIC Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang 110034, China;

4. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at flexible digital assembly process of aircraft large components, a 3D visual monitoring method of drilling process for aircraft wings is proposed based on real time onsite data in order to relieve the problems such as poorly openness of component local area, limited observation view of operators, lower level visualization of drilling process information. A data set of drilling system for onsite monitoring visualization is presented. A process for data integration between virtual and physical drilling scenario is described. Multiple 3D view management of virtual scenario and real time visualization of drilling hole feature are elaborated according to the actual requirements. A prototyping system for 3D visualization onsite monitoring of drilling process is developed based on the CATIA platform. By establishing network connection with onsite equipment servers, the system can real-time receive and display multi-dimensional information of drilling process intuitively and dynamically, which improves the onsite monitoring capability of aircraft large components drilling process.

**Keywords:** Data driven; Wing-body drilling; 3D visualization; Onsite monitoring; CATIA; Aircraft assembly;

Intelligent manufacturing

(责编 李丹)