

面向柔性装配的多测量系统 集成应用关键技术研究

Research on Critical Integrated Application Technologies of Multiple Measurement Systems in Flexible Assembly

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 杜福洲 金 杰 陈哲涵



杜福洲

博士,副教授。主要研究方向为数字化测量技术及应用、测量驱动的数字化工装配、基于MBD的产品检测与质量保证。

飞机、卫星、船舶等大型产品的装配具有作业空间大、部件结构复杂、精度要求高等特点,为了适应高效率、高精度与低成本的产品研制要求,以模块化、可重组工装和数字化测量系统为核心的柔性装配技术逐渐得到广泛研究与应用,成为大型产品数字化装配技术发展的方向^[1]。在大型产品的数字化柔性装配过程

通过多测量系统的集成应用,可以对装配过程中各部件进行全方位一次测量,包括隐藏点和难测的关键点等,减少测量盲区、提高测量效率、降低测量误差,从而保证装配质量。

中,激光跟踪仪、iGPS等数字化测量系统用于采集装配部件的测量点坐标数据,通过软件对测量数据进行处理,从而指导装配工装的定位和装配过程的监控与调整,为装配过程的柔性化和自动化提供支持^[2]。

随着产品功能的增强和性能的提升,产品部件的结构越来越复杂,大尺寸测量中需要测量的光学目标点数量多、分布范围广,对接部件还存在一些隐藏关键点和盲区。在数字化装配的过程中,一台或者一种数字化测量设备有时无法对一些隐藏关键点进行测量,这样无法精确地对部件进行测量与定位。此时需要采用多台或者多种数字化测量仪器进行协同配合测量,例如,多台激光跟踪仪协同测量、激光跟踪仪和关节臂

的配合使用等。通过多测量系统的集成应用,可以对装配过程中各部件进行全方位一次测量,包括隐藏点和难测的关键点等,减少测量盲区、提高测量效率、降低测量误差,从而保证装配质量^[3]。

因此,本文提出了一种面向柔性装配的多测量系统集成应用框架,并对多测量系统数据采集与融合分析等关键技术进行研究,在此基础上开发出一套软件原型系统,与大型产品数字化柔性装配过程中的硬件测量设备相结合,实现装配过程的多测量系统协同测量与数据分析,为保证产品装配质量和提高装配效率提供支持。最后,基于某航天器的部件数字化对接过程对论文提出的方法与软件系统进行了验证。

面向柔性装配的多测量系统集成应用框架

多测量系统集成应用以数字化测量设备为基础,以高效率、高精度的装配过程数据采集与反馈为目的,其实现途径如图 1 所示。

多测量系统的集成应用主要分为 4 个层次:

(1) 多测量系统的二次开发、测量数据的预处理、测量数据融合和数据分析与反馈。多测量系统的二次开发是指通过测量仪器提供的二次开发包,建立原型系统与测量系统的连接与通信,实现多测量系统的集成;

(2) 测量数据预处理是指通过数据采集得到测量数据,然后对测量数据进行预处理,如数据格式统一、空间坐标系对齐、时间序列同步和误差处理等,为数据融合做准备;

(3) 数据融合是指经过数据预处理后的测量数据按照一定的准则通过坐标变换、协同转站、数据融合技术等得到同一坐标系下的测量数据;

(4) 数据处理是以算法库为核心,对融合后的测量数据进行分析 and 处理,如测点不确定度评估、位姿最佳拟合、调姿规划等。

在上述关键技术研究基础上,开发一套多测量系统集成应用软件,为航天器数字化对接、飞机数字化装配和数字化检测等工程应用提供支持。

多测量系统测量过程协同技术

由于不同测量设备数据采集的准则、数据格式和采样频率不一样,在数字化对接装配过程中,为了实现多台测量设备协同测量,首先需要研究多测量系统测量过程协同技术,主要包括测量工艺规划和测量系统集成管理 2 部分。

1 面向多测量系统的测量工艺规划

现代航空航天产品制造结构复

杂性以及生产周期的提升对装配定位的测量工作在精度和效率等方面提出了极高的要求,需要实现测量设

备、研发的装配测量辅助软件、飞机数据模型三者之间的快速传递,实现各测量环节的有机组合^[4]。本软件

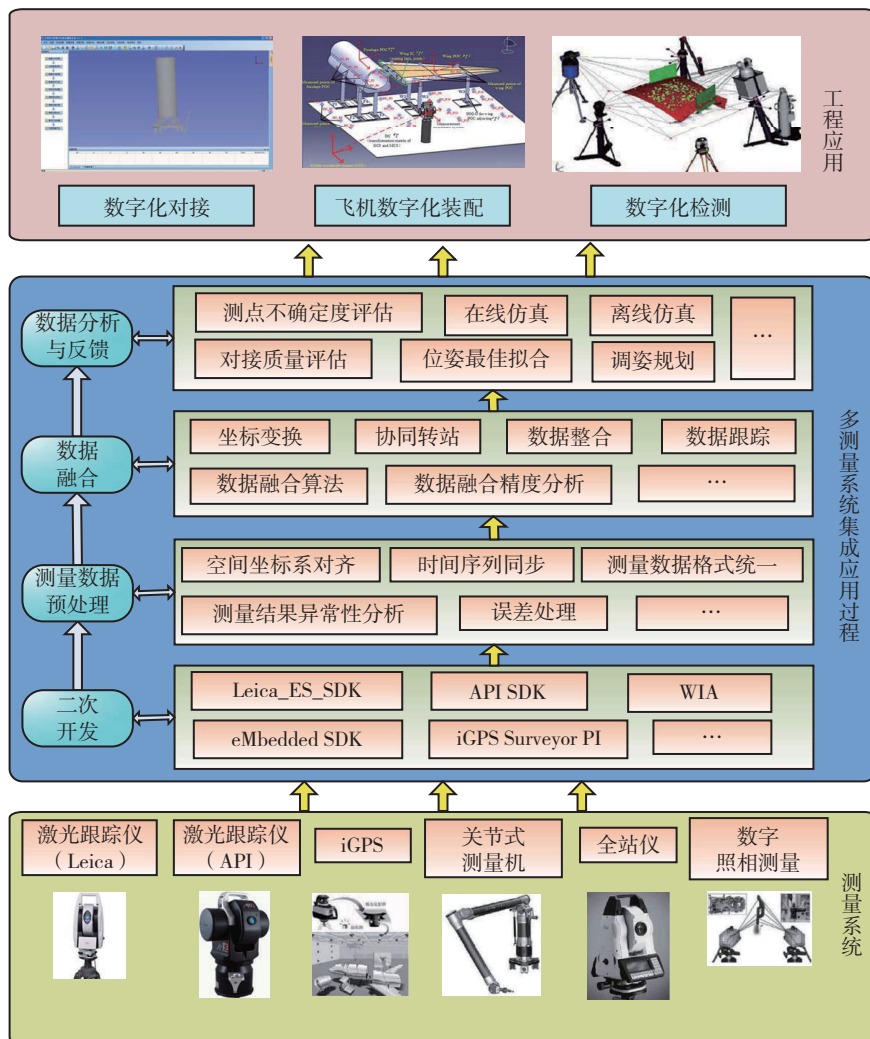


图1 面向柔性装配的多测量系统集成应用框架

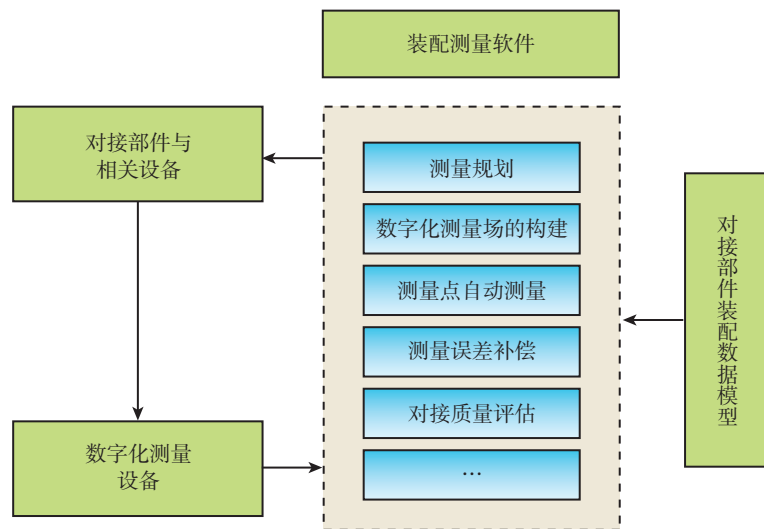


图2 多测量系统集成应用软件环境

系统以测量软件为基础,以多种数字化测量设备为实施工具,能够对待测对象实施快速精确、自动化的测量,通过对测量数据处理获得对接部件准确的位姿信息,并能够对对接结果进行分析和评估。软件系统的软件环境框架如图 2 所示。

数字化装配测量系统根据对接部件装配数据模型和多测量设备,进行测量规划和数字化测量场的构建,通过测量设备获取基准点和测量点的测量数据,根据测量数据拟合出对接部件的位姿,并根据位姿信息生成对接部件的调姿轨迹规划文件,由控制系统驱动机构运动到目标位姿,不断测量反馈并不断调整直至部件装配准确。

测量规划的主要内容为测量的布局规划和激光跟踪仪的站位规划。测点的数量和布局直接影响测量结果的准确性。因此,需要针对不同的产品几何特征、测量特征,采用不同的布点策略来达到布点的合理性要求。一般而言,在保证测量精度要求的前提下,为提高检测执行效率,测点的数量应尽可能少,测点的位置尽可能广地分布在被测几何对象上。对于基本几何对象或规则被测表面,测点布局的确定通常采用的是均匀分布方式。对于不规则被测表面,需要在曲率变化大的区域密集分布以更好地体现该区域的几何特点。

在测量过程中,测量设备所处的位置应当尽可能检测到所有的检测测量点。如果不能,在测量工艺规划阶段应当对测量设备的站位进行规划,在满足测量精度的前提下,确保使用尽可能少的仪器尽可能多地覆盖测量点^[5]。

2 基于 API 的多测量系统集成技术

通过测量系统提供的二次开发接口,建立测量系统与软件系统的连接,以 TCP/IP 协议建立通信,实现测量数据的采集,完成测量系统与软件系统初步集成。软件系统目前集成

了多种测量系统,如 Leica 激光跟踪仪、API 激光跟踪仪、iGPS。

Leica 激光跟踪仪的二次开发接口是 leica_ES_SDK, emScon 是 Leica 激光跟踪仪的开源底层控制软件,通过 emScon 可在多平台下控制 Leica 激光跟踪仪进行参数设定、简单测量、状态反馈、控制马达运动等。

iGPS 的集成是通过 iGPS 厂商提供的二次开发包 iGPS Surveyor,以 COM 方式调用厂商提供的动态链接库(Metris.Common.Communication.dll、Metris.Common.Mathematics.dll、Metris.Core.dll、Metris.Surveyor.Client.dll、Metris.Surveyor.Common.dll)来和 iGPS 服务器 Surveyor 软件进行通信。通过调用厂商提供的库来主动获取接收器的位置信息和接收推送数据。

集成多测量系统后功能实现界面如图 3 所示。

数据转换到同一测量坐标系下进行协调优化和综合处理,从而产生更为准确、可靠的信息^[6]。

测量数据融合的功能模型如图 4 所示,该模型中的数据源是指测量设备的原始测量数据,以及按照融合需要测量设备对原始数据作一定处理后的信息。

测量数据预处理是在数据融合之前,对测量数据进行空间坐标系对齐、时间序列同步以及数据误差处理等。软件系统根据预处理的数据进行坐标变换、数据滤波、数据整合等方法得到数据融合后的数据,该数据可以直接用于对接部件的位姿拟合、轨迹规划等计算。其中,数据整合是指将预处理得到的同一坐标系下的测量数据经过坐标变换得到测量点在装配坐标系、设计坐标系下的测量值,以便通过数据处理得到对接部件的姿态。

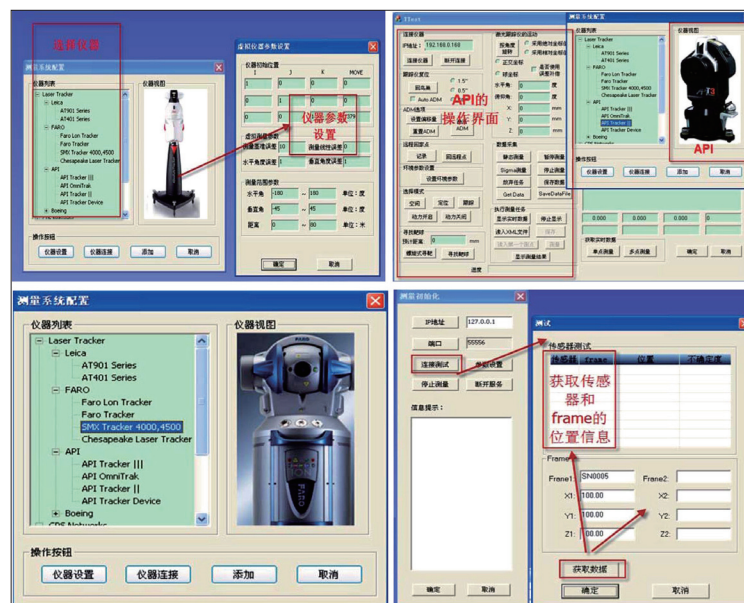


图3 多测量系统初始化的可视化界面

多源异构测量数据融合技术

多测量系统集成应用的关键是对从不同测量系统得到的多源异构测量数据的融合。数据融合的实质就是依据一定的准则,多源异构测量

1 测量数据预处理

在对接装配过程中,当使用不同测量设备对测量点进行测量时,由于测量设备、站位不同,通过数据采集得到的测量数据是在不同坐标系下、不同频率和不同数据格式的测量数据,在数据融合之前需要对测量数据

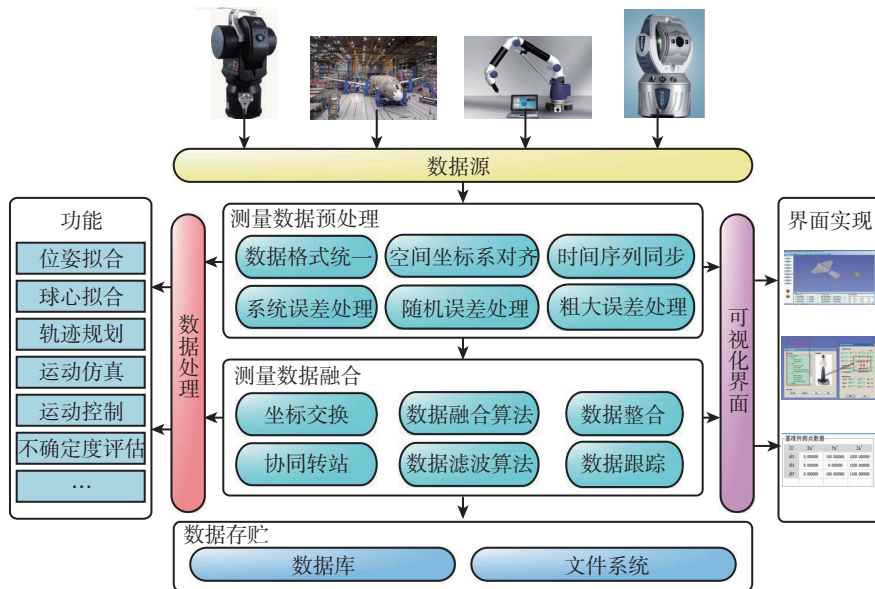


图4 多源异构数据融合功能模型

进行预处理。预处理包括数据格式统一、空间坐标系对齐及时间序列同步,并且尽可能消除一部分的测量误差。图5为多测量设备数据预处理流程图。

在对接装配过程中,不同测量设备所建立的测量坐标系不相同,因此,要保证数据融合处理的精度,数据融合之前,需要对测量坐标系进行统一,即把不同测量坐标系下的测量值通过坐标变换到同一公共坐标系上,这就是空间坐标系对齐^[4]。测量过程中由于测量设备测量机制不同,采样速率和采样时间也不同,再加上可能存在的通信网络延迟,数字换测量软件系统获取的测量数据的时间基准不同。因此,在数据融合处理前,还必须对测量数据进行时间序列同步,把测量数据推算到同一参考时间上。由于不同测量设备的测量数据格式不同,在数据融合前需要进行数据格式对准,将测量数据转化为同一格式。

在测量数据中,一般存在各种测量误差,包括粗大误差、系统误差和随机误差。目前,粗大误差剔除一般采用的准则,包括:3 σ 准则、罗马诺夫斯基准则、格罗布斯准则、狄克松准



图5 测量数据预处理流程图

则。系统误差常用的判别方法有:对比试验法、剩余误差观察法等,通过对这些方法的研究,足够多次测量的绝对误差的算术平均值就等于系统误差。对于测量中的随机误差,一般采用变量差分法和最小二乘拟合残差法^[7]。

2 测量数据融合

首先,建立数据融合坐标系,预处理后的测量数据经过坐标变换将

测量数据转换到数据融合坐标系下,根据测量装配基准点集获得数据融合坐标系与装配坐标系的转换关系,从而可以得到装配坐标系下测量点的坐标值,在经过数据整合与追踪得到对接部件的位姿信息。具体的流程如图6所示。

数据融合技术涉及到2个非常重要的技术:坐标系转换技术和基于滤波的融合算法。

(1) 坐标系转化技术。

坐标系转换技术实现数据融合坐标系、装配坐标系和部件坐标系三者之间的标定与转化。数据融合坐标系是指由多个测量系统共同建立的坐标系。装配坐标系指对接部件的对接装配运动所在的空间成为工作空间或者全局空间,该空间为装配坐标系。部件坐标系是指零部件在设计的时候所建立的坐标系。

(2) 基于滤波的融合算法。

当前主要的数据融合方法有随机融合法和人工智能法,其中卡曼滤波法、D.S证据推理为随机融合法的代;而人工智能法主要有专家系统等。最小二乘或最小二乘加权法以其精度高、容错能力强等优点广泛用于数据融合中,但是此算法没有考虑测量的不确定性,结果易受异常噪声点的影响。本文提出给予卡尔曼滤波的数据融合方法。此方法采用经典的迭代最近点对齐方法(Iterative Closest Point Registration)^[8],对齐不同坐标系下的测量数据。

经过预处理和数据融合后,即可基于算法库对测量数据进行后期处理与分析,并反馈应用到不同的业务过程中。数据处理的算法库是多测量系统集成应用的重要部分,主要包括不确定度的算法、稳定点异常点算

法、位姿拟合算法、坐标变换算法、测姿轨迹规划算法等。不同算法针对具体的业务过程实现相应的功能,如测量评价、测点不确定的评估、数字化对接和对接仿真等。

案例研究

应用上述多测量系统集成应用框架,结合关键技术研究,开发出软件原型系统,能够满足某航天器对接过程执行与功能需求。

具体操作流程如图7所示,首先读取对接模型,然后对多测量系统初始化与数据采集,初始化主要包括建立连接、设置采集频率等。软件系统根据对测量数据融合预处理可以得到对接部件的初始位姿和目标位姿,并显示在可视化面板上,最后基于测量数据和测姿规划文件完成对接仿真。

结束语

针对大型产品数字化柔性装配过程中的多测量系统集成应用需求,论文提出了面向柔性装配的多测量系统集成应用框架,研究了多测量系统测量过程协同和多源异构测量数据融合关键技术,并在此基础上开发了一套多测量系统集成应用支持软件,从而基于多种数字化测量设备,采用测量过程协同技术、测量数据融合技术和数据处理技术,实现了快速、高精度的装配对接,不仅增大了测量范围和测量的灵活性,解决了测量过程中的隐藏点和盲区的问题,而且提高了测量效率和测量精度,为大尺寸部件数字化对接装配提供保障。

参考文献

- [1] 熊涛. 卫星自动对接技术研究. 航空制造技术, 2011, 22:36-39.
- [2] 杜福洲, 陈哲涵. 测量驱动的飞机部件数字化对接系统实现技术研究. 航空制造技术, 2011, 17:52-55.
- [3] 杜福洲, 陈哲涵, 唐晓青. iGPS 测量场精度及应用研究. 航空学报, 2012(9):1737-1745.

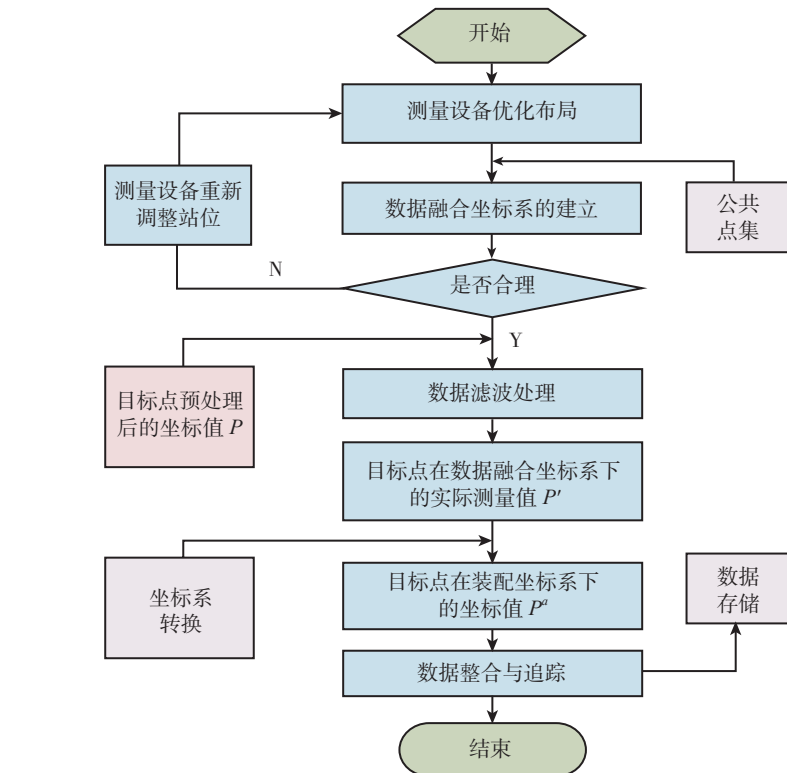


图6 测量数据融合流程图

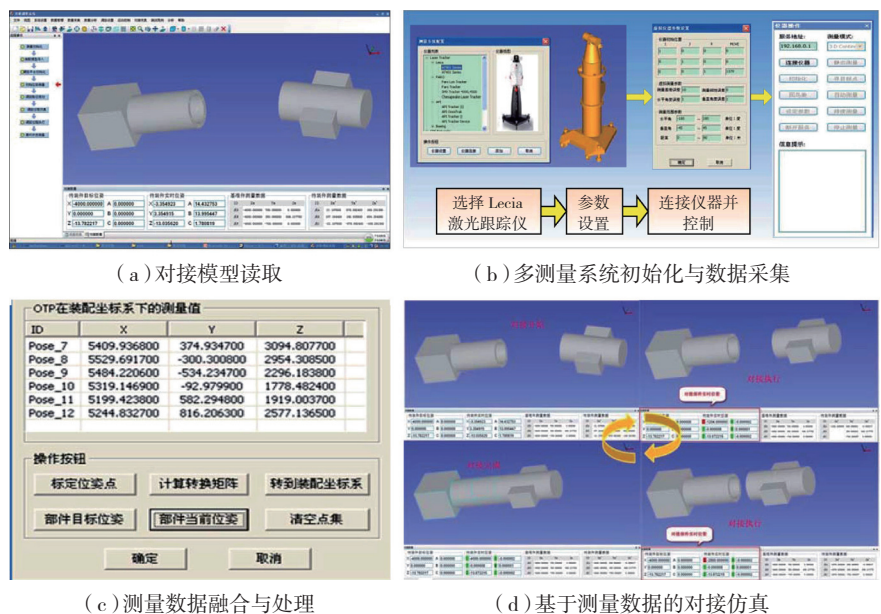


图7 多测量系统集成应用实例

- [4] 李海艳, 李维嘉, 黄运保. 基于卡尔曼滤波的多传感器测量数据融合. 武汉大学学报, 2011, 44(4):521-530.
- [5] 陈哲涵, 杜福洲. 飞机数字化装配测量场构建关键技术研究. 航空制造技术, 2012, 22:77-80.
- [6] 陈哲涵, 杜福洲, 唐晓青. 基于关键测量特性的飞机装配检测数据建模研究. 航

空学报, 2012(11):2143-2152.

[7] 胡圣波. 火箭飞行测量数据多尺度融合处理的理论及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

[8] Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm. Proceedings of 3D Digital Imaging and Modeling, 2001-05-08: 145-152.

(责编 亿霖)