

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.002

飞机大尺寸自动化柔性测量技术研究进展

汪俊¹, 李红卫²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安, 710089)

摘要: 飞机大尺寸零部件具有结构复杂、外形尺寸大等特点。传统的单一测量手段如激光跟踪仪, 因测量效率低等问题, 越来越难以满足飞机智能制造的高精度、高效率的测量需求。大尺寸自动化柔性测量技术作为一种新兴的组合式测量方法, 突破了单一测量设备测量效率低的难题, 以其高精度、高效率测量的优势, 在航空测量领域展现了极强的发展应用前景。针对飞机制造过程中大尺寸自动化柔性测量技术的研究, 本文首先综述了飞机大尺寸测量场构建的相关进展。其次, 介绍了自动化柔性扫描路径规划的研究进展。然后, 列举了柔性化测量在飞机蒙皮间隙测量、整机水平测量和数字化预装配等方面的应用现状。最终总结得出, 飞机自动化柔性大尺寸测量技术的研究对提高飞机制造过程中的质量控制具有重要的实际意义。

关键词: 大尺寸测量; 柔性化测量; 测量场; 扫描路径规划

中图分类号: V262.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)03-0353-10

Aircraft Large-Scale Automation Flexible Measurement Technology

WANG Jun¹, LI Hongwei²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company LTD, Xi'an, 710089, China)

Abstract: Aircraft parts have the characteristics of large size and complex structure. The traditional single measurement method, such as laser tracker, is more and more difficult to meet the needs of high precision and high efficiency measurement of aircraft intelligent manufacturing due to the low efficiency of measurement. As a new combined measurement method, the flexible measurement technology of large-scale measurement has broken through the problem of low measurement efficiency of single measurement equipment. With its advantages of high precision and high efficiency measurement, it has shown a strong development and application prospect in the field of aviation measurement. Aiming at the research of automatic flexible large-scale measurement technology in the aircraft manufacturing process, this paper first summarizes the relevant progress of aircraft measurement field construction. Secondly, the research progress of flexible automatic scanning path planning is introduced. Then, the application status of flexible measurement in the measurement of aircraft skin clearance, overall level measurement and digital preassembly are listed. Finally, the research of aircraft automatic flexible large-scale measurement technology is of great practical significance to improve the quality control of aircraft manufacturing process.

Key words: large-scale measurement; flexible measurement; measurement field; scanning path planning

随着数字化测量技术越来越多地应用到航空制造领域, 人工操作测量仪器已经不能满足飞机脉

基金项目: 江苏省杰出青年基金(BK20190016)资助项目。

收稿日期: 2020-04-02; **修订日期:** 2020-05-01

作者简介: 汪俊, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 大尺寸测量。中组部青年千人, 省“双创计划”人才, 江苏省特聘教授。

通信作者: 汪俊, E-mail: wjun@nuaa.edu.cn。

引用格式: 汪俊, 李红卫. 飞机大尺寸自动化柔性测量技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 353-362.
WANG Jun, LI Hongwei. Aircraft large-scale automation flexible measurement technology[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 353-362.

动生产的效率要求。另外,单一测量设备构成的测量系统,也越来越难以满足飞机大尺寸零部件的高精度测量需求。因此,为了能够满足航空制造企业不断提升的测量要求及灵活多变的测量需求,面向大尺寸零部件的柔性化测量系统被提了出来。相比于传统且单一的测量手段,自动化柔性测量可以大幅度提高测量精度与测量效率^[1]。近些年来,大尺寸的自动化扫描测量已经成为了当前航空制造领域研究的热点问题。为了实现飞机大尺寸零部件的自动化柔性测量,需要对大尺寸、高精度和组合测量理论方法进行研究,涉及流动式全局测量误差控制技术、多源测量传感器数据融合与快速处理技术、扫描测量智能路径分析技术等,才能最终实现飞机制造现场的多维度多层级的柔性化组合测量应用。

针对大尺寸飞机在制造过程中的测量问题,本文总结了自动化柔性测量的几个主要研究步骤,分别是基于柔性测量单元,根据给定的测量对象,在事先构建好的大尺寸测量场中,自主规划测量路径,完成测量数据的采集,最后对测量数据进行有效分析。因此,本文将从以下3个方面对飞机自动化柔性大尺寸测量技术进行梳理:飞机大尺寸测量场构建,自动化扫描测量路径规划及测量点云数据分析与应用。为面向飞机制造过程中大尺寸自动化测量技术的应用提供参考。

1 飞机大尺寸测量场构建

由于飞机具有大尺寸,待测量结构复杂等特点,传统测量方法采用一种或多种测量设备独立测量的方式无法保证大飞机的测量要求。现有方法一般结合多种测量设备或方法,对飞机进行测量扫描。为了对多种测量设备获取的多源数据进行融合,从而保证测量精度,需要首先构建大尺寸测量场,建立全局测量坐标系^[2-3]。

陈哲涵等^[4]对飞机数字化装配测量场构建的关键技术展开了研究,从测量设备软硬件、目标、环境、工艺和过程支持软件5个维度的参数与测量精度、时间、成本和有效测量范围4个影响的角度出发,将其在飞机装配过程中应用效果的关键特性进行耦合,提出了数字化测量场特性矩阵。浙江大学的金涨军^[5]深入研究了飞机装配中大尺寸测量场的构建、精度评价和系统配置优化方法,通过对大尺寸测量场的构建原理和方法进行详细的分析,建立激光跟踪仪转战参数误差传递模型和大尺寸测量场的误差估计模型;通过对大尺寸测量系统的布局 and 配置进行详细的分析,提出一种装配先创的测

量基准点选择优化方法和一种在带集合位置约束的以转战参数误差不确定度最小为目标的激光跟踪仪位置优化方法。Jiang等^[6]通过对扫描测量末端上的全局跟踪标记点进行研究,提出了一种由5个离散标记点组成的标记点系统,进而构建了一个由双相机与激光扫描仪组成的测量系统。该系统利用双目视觉原理对测量末端上的标记点系统进行跟踪,且标记点制作简便,能在短时间内构建起测量场。

针对大尺寸飞机装配过程中柔性测量的隐藏点和盲区等问题,杜福洲等^[7]提出了面向柔性装配的多测量系统,并开发了一套软件原型系统,提高了测量过程中的测量效率和测量精度。于浩等^[8]针对大型复杂产品检测具有的多尺度特征并存、多源测量数据融合特点,提出一种基于组合测量的大尺度产品柔性检测技术。对柔性测量单元测量精度优化问题进行建模,分析其在固定站位下的测量空间范围及测量精度分布。同时为了实现大尺寸产品的自动化柔性检测,构建了高精度的柔性测量单元,该单元具有广域移动、局域精准执行与末端高精度等特点。最后采用K-均值聚类分析实现测量站位规划,设计基于测量数据反馈的自适应控制策略。图1是大尺度产品柔性测量场景中柔性检测系统的构成。

测量场的精度是最为重要的内容,如何保证构建的测量场的整体精度能符合最终测量精度的要求,一直是大尺寸测量领域的研究重点^[9-10]。

杜福洲等^[11]针对大尺寸坐标测量系统激光跟踪仪现场测点的不确定度评定问题,进行了激光跟踪仪现场测点不确定度建模及试验分析,提出了基于蒙特卡洛仿真法的坐标点测量不确定度评定算法,同时提出一种激光跟踪仪移站测量若干固定靶标点的方法来获取激光跟踪仪在实际测量环境下传感器单元的测量误差参数。Chen等^[12]为了保证大尺寸测量对象的三维重建精度,提出了一种结合手持式三维激光扫描仪与全局定位测量仪的大尺寸测量系统。该系统可分为测量数据采集,多源数据融合及基于测量数据的三维重建等3个步骤。通过对相机标定和数据拼接误差的优化,该论文提出的三维重建精度能达到0.096 3 mm。

金涨军等^[13]分析激光跟踪仪转站过程中的测量误差传递过程,提出对转站参数误差和转站误差的理论估计模型,描述了公共观测点的配置和激光跟踪仪对公共观测点的测量误差对转站精度的影响,实现了对转站参数误差和转站误差的不确定度评定,如图2所示。曲学军等^[14]提出通过建立组合测量系统解决全局测量与局部精度控制的矛盾。

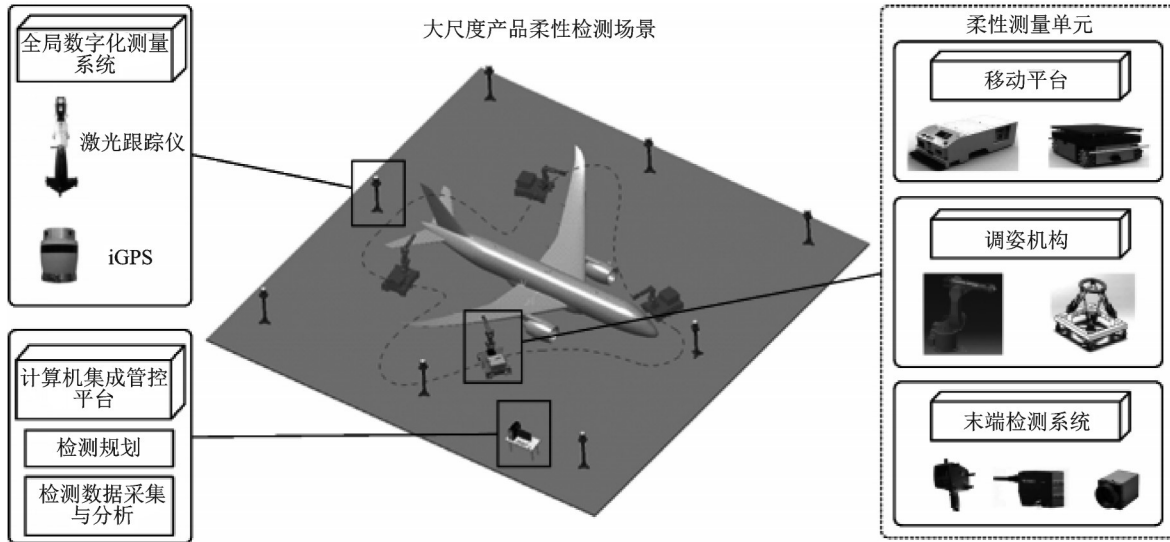


图1 柔性检测系统构成

Fig.1 Composition of flexible measurement system

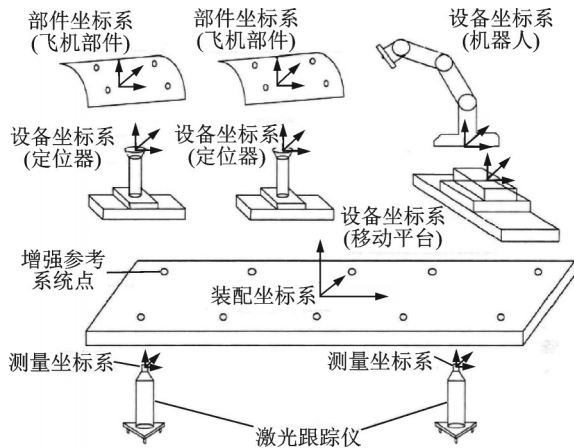


图2 大尺寸测量场的组成要素及坐标系

Fig.2 Components and coordinate system of large measurement field

如图3所示,以光学扫描仪作为前端近距离测量设备,激光跟踪仪提供全局测量基准,在扫描仪固定装置上布设合作目标建立传感器坐标系,将基坐标系坐标转换关系分解为3个独立的观测过程,建立联合各独立坐标转换关系的整体平差优化模型。杜福洲等^[15]介绍室内全球定位导航系统(Indoor global positioning system, iGPS)测量系统的工作

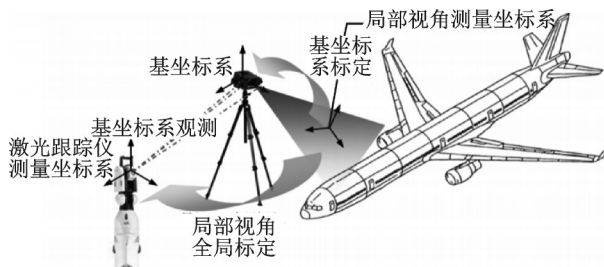


图3 组合系统测量原理

Fig.3 Combined system measurement principle

原理,并对其测量精度分布规律进行研究,提出了iGPS测量单元与测量网络的概念,分别对iGPS单元测量场和iGPS网络测量场进行精度分析,给出了基于精度约束的测量方案评估方法,采用基于三维仿真环境的精度碰撞法对测量方案进行快速评估。

在测量场多源数据融合方面,张福民等^[16]基于奇异值分解的空间配准将多测量站的数据对齐到同一坐标系下,依照矩阵加权线性方差最优融合准则,研究了相应的多传感器信息融合方法以融合多测量站的信息。Shi等^[17]为了对大尺寸零件进行快速三维测量与重建,提出了一款结合三维激光扫描仪与多个立体跟踪仪的三维测量系统。通过在三维扫描仪上集成发光二极管(LED)灯,使双目相机能实时跟踪到三维扫描仪的位姿,从而将局部扫描数据融合到全局坐标系中,实现测量数据的实时融合。

林雪竹等^[18]根据目前飞机数字化测量的发展需求,利用iGPS、激光雷达及激光跟踪仪等多种测量设备,提出了多传感融合的飞机数字化测量技术,有效解决了单种测量手段测量效率及精度较低的问题。白素琴等^[19]为了精确测量大尺度钢板的三维形状,构建了激光技术与计算机视觉相融合的三维测量系统,与单独使用视觉的方法相比,在测量速度基本相同的情况下,精度提高近一倍,系统结构如图4所示。为了能够方便地将大尺寸测量系统中,不同类型的测量数据进行更加高效的融合,Maisano等^[20]提出了一种新型模块化探头的设计,它采用不同类型的标靶和集成传感器。该探测器是多功能的目标数量,其类型和空

间位置取决于使用的大尺寸测量系统的组合,可以有效地简化测量过程。该探头设计如图5所示。Galetto等^[21]介绍了一种基于距离和角度测量的大尺寸测量系统三维位置测量的广义协同融合方法。该方法考虑了各个传感器的精度,可根据设备的不同精度指标分配相应的融合权重。不同测量系统的融合,通常是在测量前通过公共点集成局部坐标来实现的。例如,Zhao等^[22]提出了一种改进的公共点法(Modified common points method, MCMP),通过引入相互的几何约束,将协作机的不同可跟踪系统误差结合起来,最终达到优化全局精度的目的。

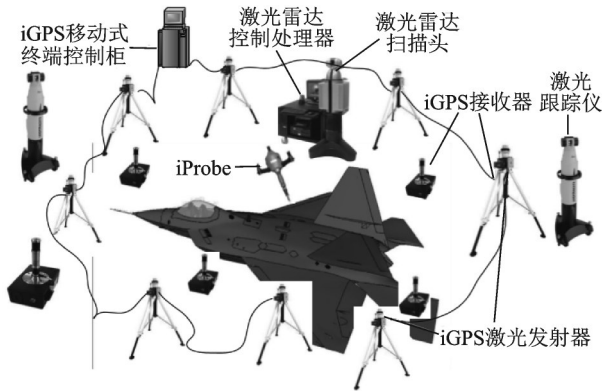


图4 组合式测量系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of combined measurement system

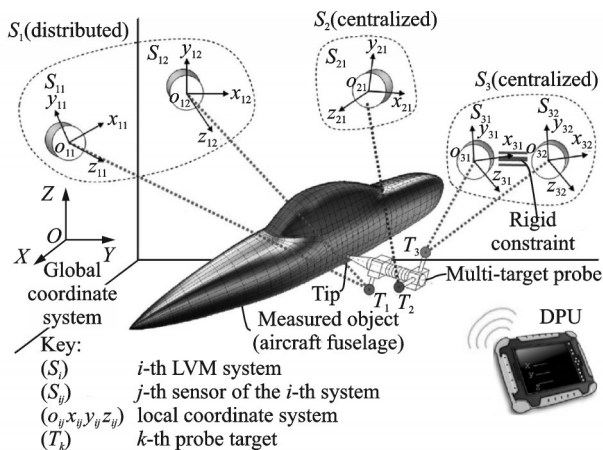


图5 多功能测量探头设计

Fig.5 Multi-function measuring probe design

2 柔性自动化扫描路径规划

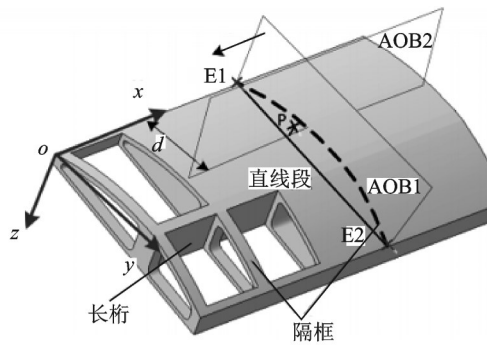
为精确获取飞机装配部件的外形和空间姿态,快速获取检测结果的分析结果,指导航空零部件精准快速装配与制造,需要采用测量末端对待测量区域进行扫描测量。大尺寸飞机测量的扫描测量末端往往由高精度的三维传感器构成。同时,近年来随着中国机器人技术的快速发展,机器人与测量领域的融合获得了不断的加深,极大地促进了自动化

柔性测量的发展。逐渐发展出基于光学测量技术和机器人技术相融合的复杂曲面柔性测量系统。为进行自动化柔性测量,利用机械臂操作扫描仪,结合自动导航(Automated guided vehicle, AGV)移动小车,实现自动化扫描测量是飞机数字化测量的必然趋势。作为其中最为关键的一步,扫描路径规划是必不可少的研究内容,根据不同的目标要求对扫描路径进行优化,能有效地提高扫描质量和效率。

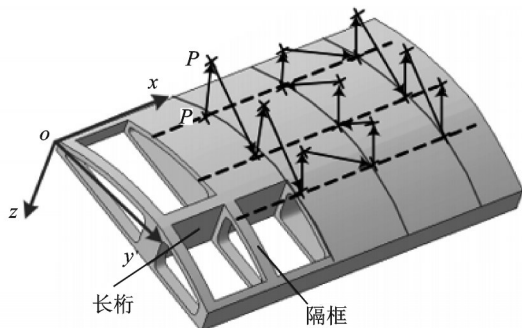
王鹏等^[23]通过建立基于线结构光三维扫描原理的数据模型,结合背影轮廓法与凸包法,提出了线结构光扫描过程中最佳视角确定的方法。该方法先利用背影轮廓法获取被测量物体的粗略表面外形,然后计算出待测物体的三维凸包,根据凸包计算出测量传感器的最佳视角,进而自动确定扫描测量路径。该方法对扫描过程中的人工操作进行了简化,同时还能保证测量数据的准确性和完整性。大连理工大学的丁祎明^[24]为提高测量精度和效率,提出了基于初始化图形交换规范(Initial graphics exchange specification, IGES)表面模型的测量规划方法。针对测量方向和速度影响测量精度和效率的问题,研究了各类的曲面法线算法,在此基础上,规划了定位点、测量行程、测量顺序等,为整体测量规划奠定了基础。浙江大学的艾小祥^[25]以飞机机翼自动化装配过程中的测量工艺为研究对象,在分析扫描仪扫描约束及扫描对象几何特性的基础上,研究了扫描了路径的自动化规划及优化方法。特别地,针对机翼针对机翼壁板的大尺寸连续曲面,通过采用行切法,提出了一种基于曲面离散点的扫描路径优化方法。同时,艾小祥等^[26]还通过分析手持式激光扫描仪的扫描约束与总体路径优化问题,提出一种基于遗传算法的扫描路径优化方法,用于机翼壁板扫描时,可减少扫描调姿次数,提高扫描效率。

邢银龙^[27]针对当前模具修复行业的半自动化修复方式,提出一种蛇形路径规划算法,在最大限度地减少激光开关动作的同时,也进一步对路径的连续性进行了约束,实现了机器人的自动修复。郑成成等^[28]针对大尺寸产品曲面外形检测效率低、精度与评定一致性差等问题,研究了基于模型的曲面外形检测方法,以飞机蒙皮为例,如图6所示,在CAD模型上提出“双截面法”的曲面布点策略,采用“锯齿形往返式”的检测路径提高大型曲面外形检测的效率和精度。用时,对大型曲面外形的评定提出了基于模型的“点一线一面”曲面综合评定方法,有效提高了曲面外形评定的一致性。

近年来,与柔性化测量技术类似,针对飞机表



(a) Bi-cross-section based surface measurement point planning strategy



(b) Zigzag-like detection path planning strategy

图6 大型曲面外形检测路径规划策略

Fig.6 Path planning strategy for large surface shape detection

面喷漆过程中的喷漆路径优化问题,研究学者也提出了不同的方法。飞机表面自动化喷漆系统通常也由AGV移动小车,机械臂及喷漆头组成。由于飞机表面喷漆技术,AGV移动小车搭载的柔性化测量末端十分类似,因此,研究飞机表面喷漆技术,对自动化柔性测量方法也具有借鉴意义。缪东晶等^[29]针对飞机喷涂问题,提出了一种飞机位姿标定与喷枪轨迹规划的方法,并将喷涂作业规划集成到CATIA平台中,开发了一套大型自由曲面产品自动喷涂机器人系统,如图7所示。黄光胜等^[30]提出了一种超声扫描自动化检测的轨迹规划方法,解决了飞机复合材料零部件超声扫描轨迹规划效率低的问题。该方法结合飞机复材构件特征与超声检测的工艺要求,实现了一种三维数字化模型驱动的复材构件超声C扫描检测的快速轨迹规划技术。于乾坤等^[31]为解决喷涂飞机等大型工件的过程中机器人的最佳站位问题,提出并利用外腕心的概念对喷涂机器人的空心手腕做球形近似,解决机器人不可解耦问题。同时,为了定量评估站位对机器人运动性能的影响,在约束和关节可用度指标分析的基础上,建立了关于展位的单点和连续喷涂任务代价函数,如图7所示。

将扫描测量末端仪器搭载在移动机器人平台上,搭配机器人手臂,不仅可以增加测量系统的柔

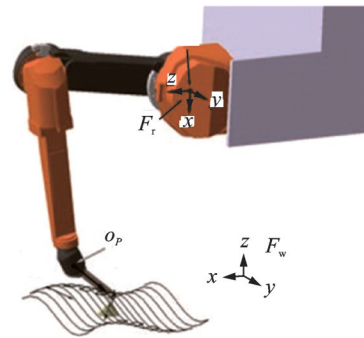


图7 喷涂机器人与喷涂路径

Fig.7 Spraying robot and spraying path

性程度,还便于对机器人进行自主扫描路径的控制。针对面扫描测量机器人,合肥工业大学的李浩^[32]通过研究测量规划中的去曲面最小包围盒算法、视点规划算法以及视场内曲面的可视性分析算法等基础算法,实现了基于面扫描测量机器人的复杂曲面自动检测方法,并在MFC框架下,采用C++语言完成了相关算法的设计与实现。文献^[33]针对飞机蒙皮外形的自动化检测问题,研究了基于激光雷达的自动化检测技术,提出了面向飞机蒙皮外形的自动化测量系统,实现了对飞机蒙皮外形的特征自动提取和测量点自动生成。大连理工大学的张晓蕾^[34]提出基于动态路径的三维扫描路径规划方案路线。该方法针对待测量物体的三维外形特征,首先将待测物体进行三维包围球表示,然后按照三维包围球对测量区域进行划分,进而进行分区域的测量路径自动规划。李强等^[35]针对飞机蒙皮对缝间隙与阶差测量中执行机构的路径规划和运动控制难题,提出将四轮全向机器人作为飞机蒙皮测量的执行机构,并采用基于蚁群算法的路径规划方法,将路径信息转变成全向机器人可识别的运动指令。梁延德等^[36]为解决被测曲面表面形貌未知时三维扫描的完整性和扫描质量问题,提出了一种工业机器人+三维激光外形扫描仪的解决方案,将工业机器人作为运动载体,搭载三维扫描仪对曲面进行测量扫描。大连理工大学的史有志^[37]提出一种基于机器人的大型回转体自动化扫描方案。该方法以回转体为测量研究对象,通过对机器人工作空间进行建模,对扫描的可达区域进行深入分析,最终利用沿轴向行切法生成大型回转体外形的扫描路径。陈允全等^[38]通过构建机器人扫描系统,提出飞机大型结构件的自动化外形检测方法。并进一步从系统构建、流程构建和轨迹规划等3个方面阐述了机器人扫描系统的组成和测量方法,如图8所示。

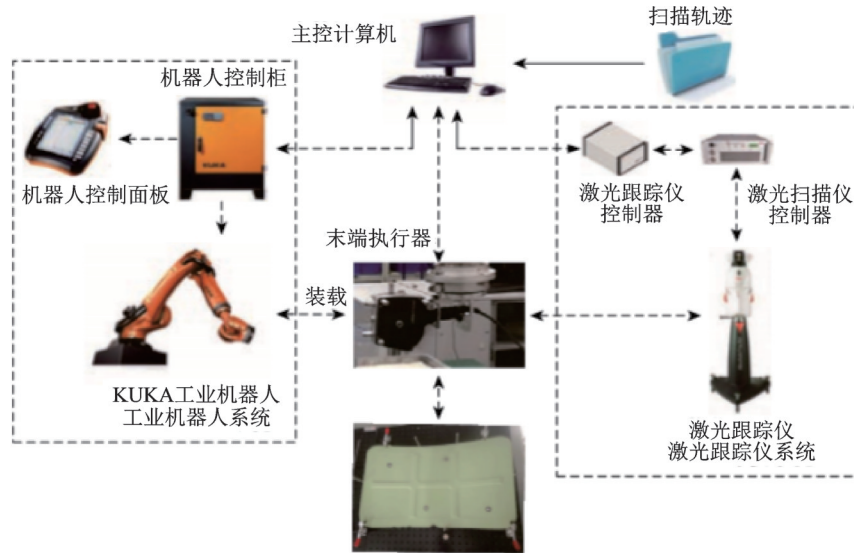


图8 机器人扫描系统的组成

Fig.8 Composition of the robot scanning system

3 测量点云数据分析与应用

通过构建大尺寸测量场,控制柔性测量单元进行自动化数据采集,可以在短时间内获取到高精度的三维点云测量数据。通过对测量数据进行合理的分析与利用,可以实现飞机蒙皮间隙阶差测量,飞机水平测量与飞机预装配控制等应用。

针对飞机蒙皮对缝阶差与间隙测量的问题,许大帅等^[39]在线结构光视觉测量技术的研究基础上,设计了一个阶差与间隙测量模型,并利用 iGPS 系统,在计算间隙与阶差的同时,在蒙皮部件上对其进行定位。如图9所示,通过线结构光视觉床干起与 iGPS 的联合测量,可以实现阶差与间隙在尺度和位置两个方面的非接触、高精度测量。文献[40]针对飞机蒙皮装配间隙与阶差的数字化测量问题,提出了一种基于全向机器人测量平台的测量模式,设计了一个基于多系统集成的间隙与阶差测量系统,并且为验证系统性能,自主开发了间隙与阶差测量软件,如图10所示。

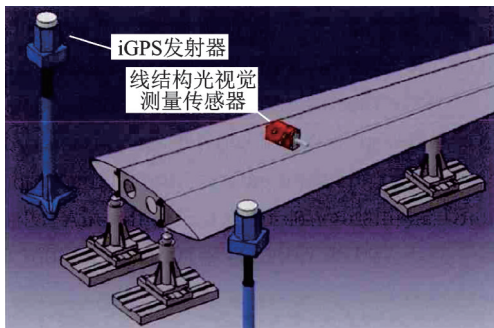


图9 线结构光视觉传感器与iGPS联合测量示意图

Fig.9 Schematic diagram of combined measurement of linear structured light vision sensor and iGPS

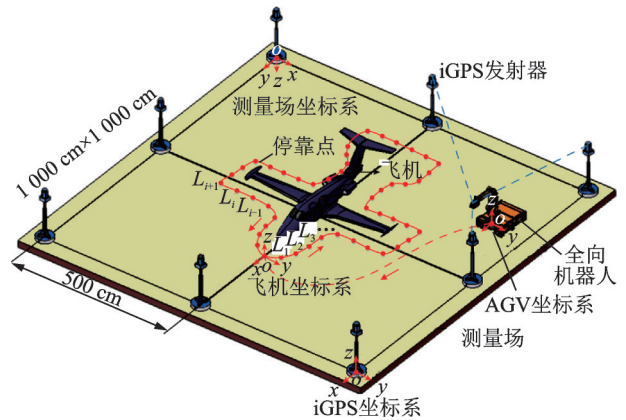


图10 间隙与阶差测量系统应用场景

Fig.10 Gap and step difference measurement system application scene

针对飞机水平测量的问题,电子科技大学的栗辉^[41]针对飞机水平测量中效率低、可重复性差以及误差波动大等问题,提出了一种既能保证测量精度,又能减少操作人员工作量的数字化测量方法。该方法通过坐标融合数学模型将 iGPS 系统与激光雷达相融合,实现飞机外形基准数据的采集与传递。喻世臣等^[42]针对传统飞机水平测量方法精度、效率低的问题,将 iGPS 与激光跟踪仪进行结合,实现了测量范围广、测量精度高的多传感器测量系统,实现了大尺寸飞机的数字化水平测量。

为了将扫描测量数据在飞机装配过程中进行有效的利用,南京航空航天大学的张微^[43]针对由于装配件产生干涉或间隙而引起零件的反复试装的问题,通过扫描实际构件得到点云数据,然后利用虚拟装配技术,分析装配件间的干涉情况,从而指导实构件的位姿调整。壁板数字化位姿调整过

程,通过光学工具球点(Optical tooling points, OTP)可将壁板的定位器的位姿信息从虚拟装配环境中传递到实际装配环境,从而实现壁板的位姿调整。赵海洋等^[44]针对装配体小间隙在线快速测量问题,提出了一种基于三维点云重构的配合面装配间隙测量分析方法。如图11所示,该算法首先利用双目采集系统获取零件点云,并对数据进行过滤处理;然后通过逆向重建技术完成曲面重构,最后在CATIA的虚拟环境中按照一定的约束关系进行虚拟装配,分析其装配间隙。东华大学的孔庆超^[45]针对航天结构件的半实物模型的点云处理技术进行了研究,分析了点云模型的采样、精简、去噪、特征提取以及点云模型与CAD模型配准等技术,通过人机交互,实现大尺寸航天结构件的一次性装配。通过区域映射进行对应点搜索以及增加装配特征权重因子的方式,对传统迭代最近点(Iterative closest point, ICP)算法进行了改进,可大大提高点云匹配效率,保证配准精度。

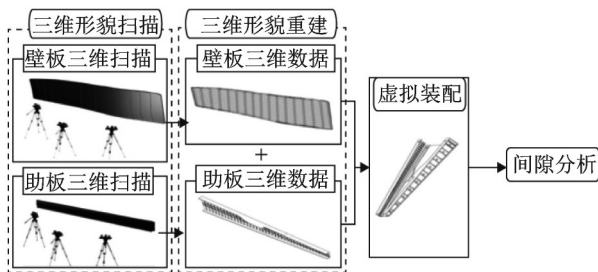


图11 间隙分析总体方案流程图

Fig.11 Flow chart of overall plan for gap analysis

另外,王青等^[46]针对叉耳接头因装配变形而产生的实际位姿与理论位姿不一致问题,通过最小距离分析,判断接头间的干涉情况。在此基础上,利用大尺寸测量手段,提出了一种机翼位姿调整方案,该方法可以适用于多种叉耳接头布局方式。文献^[47]针对飞机薄壁结构件提取边界特征效率低的问题,利用扫描线点云的分布特点,提出了一种扫描线点云的逐行处理算法。首先通过邻域搜索获得局部测量点,然后将测量点投影到扫描平面上,最后拟合出边界特征线。此算法可以避免点云分区、曲面拟合等几个耗时的复杂计算,从而提高大规模点云处理的效率。

4 结 论

对飞机自动化柔性大尺寸测量技术的深入研究,对航空制造过程中的质量控制具有重要意义。就大尺寸测量技术而言,大型测量场构建是影响该技术实际应用的核心因素。就目前研究进展来看,大尺寸测量场的构建,仍然处于实验室研究阶段。

真正在航空制造企业的应用还远未起步。因此,考虑到航空制造现场环境的复杂性,如何利用较少的设备,构建完成满足精度要求且运行效率高,并真正能在实际制造应用起来的测量场,是未来研究的一个重点方向。另外,完整的基于柔性测量单元的扫描测量自动规划技术也还未真正成熟。现阶段测量路径规划技术集中在小目标的测量规划,无法适应未来飞机测量大尺寸、全方位的测量需求。由此可见,针对大飞机装配现场对待装配部件柔性化测量的迫切需求,结合全向移动平台及工业机械臂组成柔性测量平台系统,通过智能算法驱动来实现移动平台的自主导航定位与避障技术,同时实现机械臂的测量路径自动规划,是未来研究的一个重点方向。

最后,在大型飞机自动化柔性测量与分析中,对整机外形进行自动化柔性测量占据着非常重要的地位。现有的整机外形测量方法,普遍采用人工操作测量仪器对飞机进行局部测量,随后借助标记点对测量数据进行融合得到整机测量数据。这种测量方式,自动化程度低,测量效率偏低,且精度无法保证,已经无法满足大型飞机制造及装配。同时也可以看出,飞机整体结构件加工变形在线测量正在逐渐向具有自动化、快速性、自适应性以及整体柔性的在线精密自动测量系统等方面发展。

参考文献:

- [1] SCHMITT R H, PETEREK M, MORSE E, et al. Advances in large-scale metrology-review and future trends[J]. CIRP Annals, 2016, 65(2): 643-665.
- [2] ZHANG Yang, LIU Wei, LAN Zhiguang, et al. Global measurement method for large-scale components based on a multiple field of view combination[J]. Journal of Sensors, 2017, 2017 (12): 8765450.
- [3] SHI Jinlong, SUN Zhengxing, BAI Suqin. Large-scale three-dimensional measurement via combining 3D scanner and laser rangefinder[J]. Applied Optics, 2015, 54(10): 2814-2823.
- [4] 陈哲涵,杜福洲.飞机数字化装配测量场构建关键技术研究[J].航空制造技术,2012,48(22):77-80.
CHEN Zhehan, DU Fuzhou. Research on the key technology of the construction of aircraft digital assembly measuring field[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2012, 48(22): 77-80.
- [5] 金涨军.飞机装配中大尺寸测量场的建立与优化技术[D].杭州:浙江大学,2016.
JIN Zhangjun. Establishment and optimization of large-scale measurement field in aircraft assembly[D].

- Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [6] JIANG T, CHENG X, CUI H, et al. Combined shape measurement based on locating and tracking of an optical scanner[J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, 14: 6-21.
- [7] 杜福洲, 金杰, 陈哲涵. 面向柔性装配的多测量系统集成应用关键技术研究[J]. *航空制造技术*, 2014, 4(13): 43-47.
DU Fuzhou, JIN Jie, CHEN Zhehan. Research on key technologies of integrated application of multiple measurement systems for flexible assembly[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2014, 4(13): 43-47.
- [8] 于浩, 杜福洲. 基于组合测量的大尺度产品柔性检测技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(5): 1037-1046.
YU Hao, DU Fuzhou. Flexible inspection technology of large scale products based on combination measurement[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2019, 25(5): 1037-1046.
- [9] ZHAO Gang, ZHANG Chengyang, JING Xishuang, et al. Station-transfer measurement accuracy improvement of laser tracker based on photogrammetry[J]. *Measurement*, 2016(94): 717-725.
- [10] LIU Wei, LAN Zhiguang, ZHANG Yang, et al. Global data registration technology based on dynamic coded points[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 67(2): 394-405.
- [11] 杜福洲, 王怀. 激光跟踪仪现场测点不确定度建模及试验分析[J]. *制造业自动化*, 2013, 35(3): 23-26.
DU Fuzhou, WANG Huai. Uncertainty modeling and experimental analysis of laser tracker on-site measurement points[J]. *Manufacturing Automation*, 2013, 35(3): 23-26.
- [12] CHEN Zhe, ZHANG Fumin, QU Xinghua, et al. Fast measurement and reconstruction of large workpieces with freeform surfaces by combining local scanning and global position data[J]. *Sensors*, 2015, 15(6): 14328-14344.
- [13] 金涨军, 李江雄, 俞慈君, 等. 大尺寸空间测量中转站误差分析与评估[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(4): 655-661.
JIN Zhangjun, LI Jiangxiong, YU Cijun, et al. Registration error analysis and evaluation in large-volume metrology system[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Edition)*, 2015, 49(4): 655-661.
- [14] 曲学军, 孟飙, 刘春. 大尺寸自由曲面部件组合测量现场全局标定优化方法与应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(9): 2384-2392.
QU Xuejun, MENG Biao, LIU Chun. Optimization method and application of on-site global calibration for combined measurement of large-scale free-form surface parts[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2015, 21(9): 2384-2392.
- [15] 杜福洲, 陈哲涵, 唐晓青. iGPS测量场精度分析及其应用研究[J]. *航空学报*, 2012, 33(9): 1737-1745.
DU Fuzhou, CHEN Zhehan, TANG Xiaoqing. Precision analysis and application of iGPS survey field[J]. *Journal of Aeronautics*, 2012, 33(9): 1737-1745.
- [16] 张福民, 曲兴华, 叶声华. 大尺寸测量中多传感器的融合[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1236-1239.
ZHANG Fumin, QU Xinghua, YE Shenghua. Multiple sensor fusion in large scale measurement, optics and precision engineering[J], 2008, 16(7): 1236-1239.
- [17] SHI Jinlong, SUN Zhengxing, BAI Suqin. 3D reconstruction framework via combining one 3D scanner and multiple stereo trackers[J]. *The Visual Computer*, 2018, 34(3): 377-389.
- [18] 林雪竹, 曹国华, 李丽娟, 等. 多传感器融合的飞机数字化测量技术[J]. *航空制造技术*, 2013(7): 46-49.
LIN Xuezhu, CAO Guohua, LI Lijuan, et al. Aircraft digital measuring technology of multi-sensor fusion[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013(7): 46-49.
- [19] 白素琴, 史金龙, 钱强, 等. 视觉与激光相融合的大尺度钢板三维测量[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(3): 581-589.
BAI Suqin, SHI Jinlong, QIAN Qiang, et al. 3D measurement of large steel plates based on the integration of computer vision and laser technology[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2015, 26(3): 581-589.
- [20] MAISANO D, MASTROGIACOMO L. A novel multi-target modular probe for multiple Large-Volume Metrology systems[J]. *Precision Engineering*, 2018 52: 30-54.
- [21] GALETTO M, MASTROGIACOMO L, MAISANO D, et al. Cooperative fusion of distributed multi-sensor LVM (Large Volume Metrology) systems[J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(1): 483-486.
- [22] ZHAO G, ZHANG P, XIAO W. Coordinate alignment of combined measurement systems using a modified common points method[J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, 13(3): 21-42.
- [23] 王鹏, 孙长库, 陶立. 最佳视角3-D激光扫描路径的自动确定方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007(11): 1980-1983.
WANG Peng, SUN Changku, TAO Li. Automatic determination method of 3-D laser scanning path with the best viewing angle[J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2007(11): 1980-1983.
- [24] 丁伟明. 基于CAD模型的测量规划与可视化[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
DING Weiming. Measurement planning and visualization

- tion based on CAD model[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [25] 艾小祥. 飞机机翼装配中的扫描路径规划研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
AI Xiaoxiang. Research on scanning path planning in aircraft wing assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [26] 艾小祥, 俞慈君, 方强, 等. 基于遗传算法的机翼壁板扫描路径优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(3): 448-456.
AI Xiaoxiang, YU Cijun, FANG Qiang, et al. Optimization of scanning path of wing panel based on genetic algorithm[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2015, 49(3): 448-456.
- [27] 邢银龙. 基于平面扫描的路径规划算法研究[J]. 机器人技术与应用, 2019, 187(1): 33-36.
XING Yinlong. Research on path planning algorithm based on plane scanning[J]. Robot Technology and Application, 2019, 187(1): 33-36.
- [28] 郑成成, 杜福洲. 基于模型的大型曲面外形检测与评定[J]. 制造业自动化, 2016, 38(12): 55-60.
ZHENG Chengcheng, DU Fuzhou. Inspection and evaluation of large curved surface based on model[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(12): 55-60.
- [29] 缪东晶, 吴聊, 徐静, 等. 飞机表面自动喷涂机器人系统与喷涂作业规划[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(2): 547-553.
MIU Dongjing, WU Liao, XU Jing, et al. Automatic spraying robot system for aircraft surface and spraying operation planning[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2015, 45(2): 547-553.
- [30] 黄光胜, 王美清, 杜福洲, 等. 飞机复合材料构件超声C扫描检测轨迹规划系统研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(10): 132-135.
HUANG Guangsheng, WANG Meiqing, DU Fuzhou, et al. Research on trajectory planning system for ultrasonic C-scan inspection of aircraft composite components[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(10): 132-135.
- [31] 于乾坤, 王国磊, 任田雨, 等. 一种移动喷涂机器人的高效站位优化方法[J]. 机器人, 2017, 39(2): 249-256.
YU Qiankun, WANG Guolei, REN Tianyu, et al. An efficient method of position optimization for mobile spraying robot[J]. Robot, 2017, 39(2): 249-256.
- [32] 李浩. 面向面扫描测量机器人的测量规划基础算法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.
LI Hao. Research on the basic algorithm of measurement planning for face-to-face scanning measurement robot[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [33] 许龙. 飞机蒙皮外形的自动化检测技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
XU Long. Research on automatic detection technology of aircraft skin shape[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [34] 张晓蕾. 基于动态路径规划的三维扫描方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
ZHANG Xiaolei. Research on 3D scanning method based on dynamic path planning[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [35] 李强, 杜福洲. 全向机器人蚁群算法路径规划与运动控制研究[J]. 机械设计与制造, 2018(S2): 157-159, 163.
LI Qiang, DU Fuzhou. Path planning and motion control of omnidirectional robot based on ant colony algorithm[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2018(S2): 157-159, 163.
- [36] 梁延德, 王瑞锋, 何福本, 等. 基于工业机器人的三维扫描技术研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018, 534(8): 57-59, 67.
LIANG Yande, WANG Ruifeng, HE Fuben, et al. Research on 3D scanning technology based on industrial robot[J]. Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2018, 534(8): 57-59, 67.
- [37] 史有志. 基于机器人的大型回转体外形扫描轨迹规划与仿真[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
SHI Youzhi. Trajectory planning and simulation of large-scale revolving body based on robot[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [38] 陈允全, 李泷泉, 黄翔, 等. 基于机器人的飞机大型结构三维自动化检测方法[J]. 航空制造技术, 2019, 62(10): 51-57.
CHEN Yunquan, LI Longqiao, HUANG Xiang, et al. Robot based 3D automatic inspection method for large aircraft structure[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 51-57.
- [39] 许大师, 杜福州. 基于线结构光的飞机蒙皮对缝阶差与间隙测量技术研究[J]. 航空制造技术, 2017(5): 77-81.
XU Dashuai, DU fuzhou. Research on measurement technique of the stepped difference and gap between aircraft skins based on linear structural light[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(5): 77-81.
- [40] 杜福州, 于浩, 李强. 基于多元测量数据融合的间隙与阶差自动化测量技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 14-20.
DU FuZhou, YU Hao, LI Qiang. Research on gap and step difference automatic measurement data fusion[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 14-20.
- [41] 栗辉. 基于iGPS和激光雷达的飞机水平测量设计与

- 实现[D]. 成都:电子科技大学,2019.
- LI HUI. Design and implementation of aircraft level measurement based on iGPS and lidar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [42] 喻世臣,唐晓峰,翟南,等.基于激光跟踪仪 iGPS 的飞机水平测量技术研究[J].航空制造技术,2015,58(21): 119-121.
- YU Shichen, TANG Xiaofeng, ZHAI Nan, et al. Study of aircraft level-testing measurement technology based on laser tracker and iGPS, aeronautical manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(21): 119-121.
- [43] 张微.基于实测数据的飞机部件数字化预装配技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- ZHANG Wei. Research on aircraft components digital preassembly based on measured data[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [44] 赵海洋,张洋,兰志广,等.基于点云三维重构的配合面装配间隙分析方法研究[J].理论与实践,2017,37(3): 20-23.
- ZHAO Haiyang, ZHANG Yang, LAN Zhiguang, et al. Research on fitting clearance analysis method based on 3D reconstruction of point cloud[J]. Theory and Practice, 2017, 37(3): 20-23.
- [45] 孔庆超.大尺寸航天结构件装配的半实物模型点云处理关键技术研究[D].上海:东华大学,2017.
- KONG Qingchao. Research on key technique point cloud processing for semi-physical model of large size aerospace structure assembly[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [46] 王青,范胜豪,程亮,等.基于实测数据的翼身交点接头干涉检测方法[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(2): 207-232.
- WANG Qing, FAN Shenghao, CHENG Liang, et al. Interference detection method of wing-fuselage joints based on measured data[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2018, 52(2): 207-232.
- [47] 余飞祥,黄翔,李泷杲,等.基于扫描线点云的飞机蒙皮边界特征提取[J].计算机集成制造系统,2017,23(4): 701-707.
- YU Feixiang, HUANG Xiang, LI Shuanggao, et al. Aircraft skin boundary extraction based on scan line point cloud[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 701-707.

(编辑:陈珺)