

基于机器人的飞机大型结构三维自动化检测方法

陈允全¹,李泷泉²,黄翔²,李琦²,林晶²

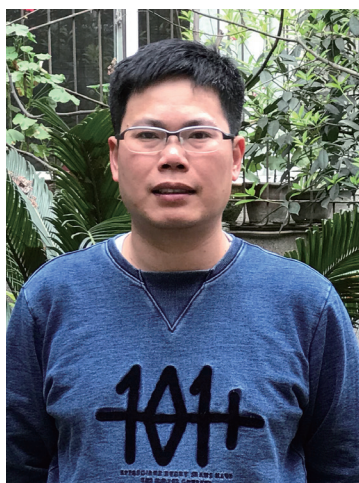
(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限公司,成都 610092;

2. 南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 外形数据测量是飞机装配中至关重要的一环。传统模拟量检测无法满足飞机大型结构点的外形测量需求,而单独的数字化测量设备和方法又难以实现大尺寸和复杂结构的测量。构建了由工业机器人和激光跟踪仪组成的自动化扫描系统,研究了飞机大型结构自动化检测方法。根据轨迹规划和仿真的结果,实现机器人扫描系统对大型结构测量,将测量结果与理论数模比较就可以分析大型结构的误差信息,实现对大型结构的检测。

关键词: 飞机装配;激光扫描;大尺寸测量;检测方法;机器人

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.051



陈允全

高级工程师,主要从事部件装配等研究。

复杂曲面零件被广泛应用于飞机制造领域,飞机装配中对零件的外形数据进行检测,对提升飞机制造质量至关重要。例如,飞机装配过程中要求对飞机蒙皮进行检测,一方面,飞机蒙皮构成了飞机的气动外形;

另一方面,蒙皮与骨架之间的间隙不能超过固定值,且不能通过螺栓拉紧实现壁板与骨架之间的贴合^[1]。由于飞机蒙皮尺寸大,零件存在误差和变形,装配积累误差^[2]等原因,装配后的蒙皮对缝间隙和阶差会出现超出设计容限的情况,从而影响飞机装配质量和装配进度,因此需要对飞机蒙皮对缝间隙和阶差进行测量。

传统检测使用卡板、塞尺等模拟量测量或者通过人工观察进行修配的方式,检测效率低,检测质量差,难以保证飞机装配质量,数字化外形数据检测势在必行。近年来,国内飞机制造厂引进了大量可用于外形测量的数字化设备,如激光跟踪仪、激光雷达、激光扫描仪和关节臂测量仪器等。国内高校和研究所也在 863 计划的支持下,大范围展开了数字化外形测量技术的研究,取得了丰硕的研究成果。浙江大学艾小祥等构建了由激光跟踪仪、激光扫描仪、数控机床、扫描测量软件组成的自动化扫

描测量系统,并对扫描轨迹规划进行了研究,该系统可以快速扫描机翼壁板及骨架的外形,获取其外形点云数据,通过零件外形点云数据可以有效地协调机翼壁板及骨架姿态,指导装配,评价装配质量^[3-4]。南京航空航天大学严成^[5]等将三维激光扫描技术应用到飞机蒙皮对缝测量中,使用激光扫描仪 T-Scan 实现了飞机蒙皮对缝的外形扫描,研究了对缝外形数据处理方法,由此实现了蒙皮对缝的数字化测量。

然而,单一的设备必然有其局限性,单点测量设备如激光跟踪仪和激光雷达,其测量效率低;而多点测量扫描设备的测量范围如激光扫描仪和摄影测量,其测量范围有一定的限制。合理的飞机装配数字化测量体系应当由多种测量设备组成,应根据不同的测量对象和测量需求选择测量设备。本文针对飞机装配中大型结构的外形测量需求,构建了一种机器人扫描系统,激光扫描仪安装在机

器人末端,与激光跟踪仪一同组成激光扫描系统,并研究了自动化检测的关键技术,包括轨迹规划、扫描仿真和数据处理。该系统以载体实现自动化测量,扩大了手持式激光扫描仪 T-Scan 的测量范围,为飞机大型结构的外形数据自动化测量提出一种新的方法和解决方案。

机器人扫描系统构建

飞机大型构件具有空间尺寸大、特征种类多、测量精度要求高等特点。测量设备应满足测量效率、测量精度和测量范围等要求。

飞机制造中常用的外形测量设备主要有激光雷达、摄影测量和激光扫描仪。激光雷达的测量方式是基于激光测距原理的单点测量,对于大面积的外形数据获取效率较低,且测量方式不够灵活,无法实现对复杂特征的测量。摄影测量基于三角测量原理实现物体表面的点云扫描,实现了表面细节特征的测量,但由于视野限制,大面积测量需借助编码点进行图像拼接完成,准备过程繁琐耗时,而且编码点容易遗漏,影响飞机的飞行性能和安全。随着范围的变大,测量数据拼接的误差也就越大。

结合飞机大型构件特点和其测量需求,本文选用 Leica T-Scan 5 激光扫描仪作为测量设备。激光扫描仪与激光跟踪仪组成的测量系统可以快速获取待测物体外形数据,它的测量效率高,平面测量精度能够达到 0.08mm,测量方式灵活,能够以多种姿态实现测量。

在此基础上,为了扩大测量范围和提高自动化程度,需要选择测量系统的载体。载具的选择包括机床与工业机器人。机床的优点是运动精度高、刚性好,但是本文中使用的激光扫描仪测量精度与载具无关。同时机床需要根据测量对象进行定制,用途过于单一。对于大型构件,需要尺寸更大的机床才能实现测量,导致

机床体积巨大,造价昂贵。工业机器人的绝对定位精度和刚性不如机床,但是其运动范围大、定位精度高、末端姿态变化灵活,是理想的扫描运动载体,因此本文使用 KR90R3100 extra 工业机器人作为测量系统的载具。

本文构建的机器人扫描系统由工业机器人、激光跟踪仪系统、激光扫描仪和夹持触发装置组成,如图 1 所示。激光跟踪仪与激光扫描仪组成扫描测量系统,激光扫描仪与夹持触发装置组成末端执行器,机器人作为载体带动激光扫描仪实现扫描测量。

Leica 激光跟踪仪是一种常见的数字化三维坐标测量系统。激光跟踪仪测量系统具有测量精度高、测量速度快和动态测量的特点,已被广

泛应用于航空航天、汽车、造船、机械制造、核工业等精密工业测量领域^[6]。本文扫描系统使用的激光跟踪仪型号为 Leica AT901-MR,激光跟踪仪可以通过其附件实现多种方式的数字化测量,其中激光跟踪仪与 T-Cam 和 T-Scan 配合可以实现待测物体外形数据的扫描测量,本文所使用的激光扫描仪型号为 Leica T-Scan 5,如图 2 所示。

T-Scan 可以针对被测零件的材料、表面质量和光照条件,合理选择扫描参数和点密度,达到最佳的测量效果,因此适合测量使用复合材料、金属和油漆表面的飞机构件^[7]。T-Scan 具有较高的数据点采集速度,最高数据采集率高达 21000 点/s,且数据的精度较高,在细小特征测量与快速获得大量点云数据方面有巨

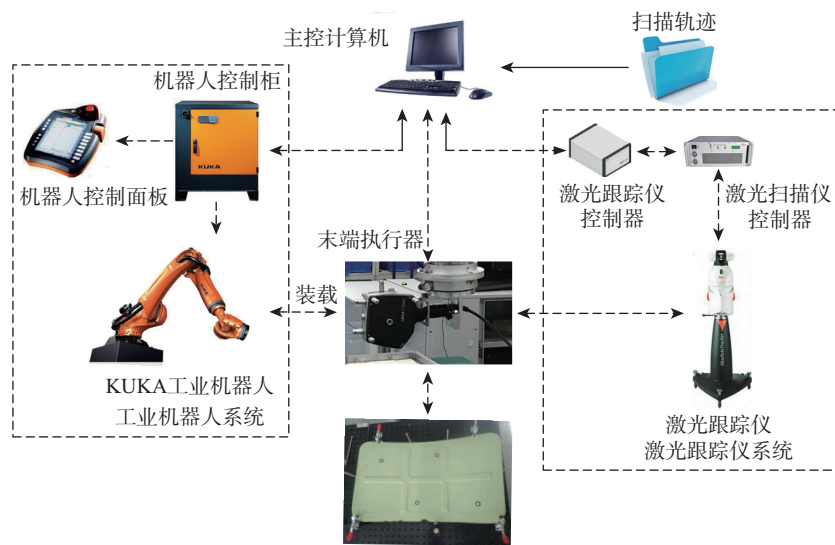


图1 机器人扫描系统组成

Fig.1 Composition of robot scanning system

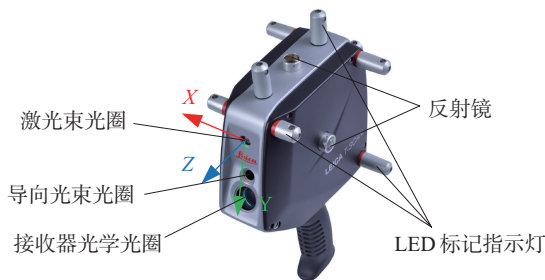


图2 激光扫描仪T-Scan

Fig.2 Laser scanner T-Scan

大优势^[8]。

在机器人扫描系统进行测量时,上位机需要通过软件实现硬件控制和信息传输,因此本系统根据测量过程中的需求开发了基于 C++ 的扫描控制软件。通过合理设计功能模块和集成软件功能,有效提高了扫描过程的效率。

机器人扫描控制软件主界面是所有功能模块的交互入口。图 3 中,上方为网络通信模块和设备控制模块,网络通信模块负责建立通讯机制,主要指上位机与机器人、激光跟踪仪等系统间的数据交互。通过建立连接,上位机可将指令文件或参数文件通过相应通信接口发送至被控设备,被控设备亦可将其状态参数等向上反馈给上位机,实现数据实时交互;各控制模块主要负责上位机对机器人、激光跟踪仪等其他硬件系统的控制。该模块对控制软件向下传输的指令文件或参数文件与相应设备进行匹配与编译,实现对指定设备的控制,如机器人六轴控制、T-Scan 触发机构控制等。主控计算机与工业机器人之间的通信由工业以太网和 Windows Socket 网络通信技术实现,数据传输采用 TCP/IP 协议。中间为机器人扫描控制区,主要功能是打开扫描轨迹、轨迹变换和机器人运动控制。右下方为信息提示区,用于显示激光跟踪仪和机器人返回的信息以及程序提示。右上方为坐标系统一模块,主要功能是各坐标系的标定和齐次变换矩阵计算,测量过程中的坐标系组成如图 4 所示。

机器人扫描系统涉及的坐标系包括法兰坐标系 {Flange}、机器人根坐标系 {Root}、基坐标系 {Base}、工具坐标系 {Tool}、激光跟踪仪测量坐标系 {TM} 和工件坐标系 {Part}。本文采用激光跟踪仪作为标定的测量设备,因此选择激光跟踪仪的测量坐标系作为中间转换媒介,测量坐标系位于激光跟踪仪内部,由激光跟踪

仪系统内部构建。

机器人扫描系统 工作流程构建

基于飞机大型构件测量需求来构建飞机大型构件外形测量系统工作流程,如图 5 所示。系统工作流程可以划分成数字化定义、轨迹规划和数据处理测量 4 个步骤。

1 数字化定义

首先根据测量需求,从整体数模中提取待测物体数模和坐标系;接着在零件数模中建立基准点,并提取

基准点坐标,基准点的作用是建立工件坐标系,工件坐标系是坐标系统一和处理测量结果的基础。

2 轨迹规划

扫描轨迹是机器人扫描系统完成测量的关键。本研究使用组件引用架构(CAA)对 CATIA 进行开发,在 CATIA 中使用自动生成软件,按照测量特征类别(曲面、边界、孔)进行初始轨迹规划。为了提高曲面扫描的测量精度,对激光扫描仪的测量数据中的误差进行分析和试验,建立了系统误差预测模型,通过粒子群

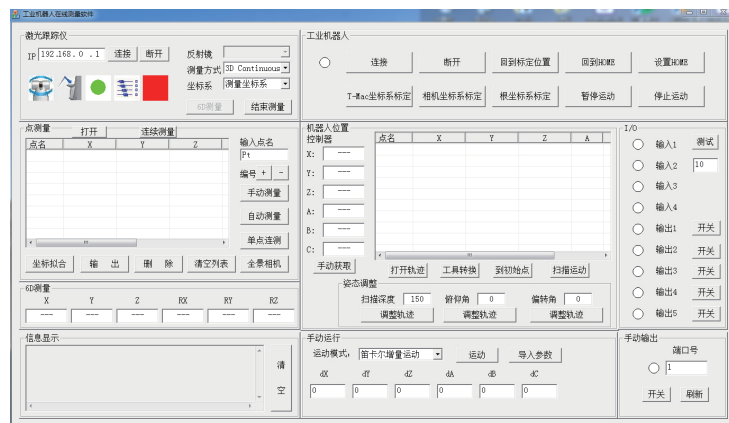


图3 机器人扫描控制软件主界面

Fig.3 Main interface of robot scanning control software

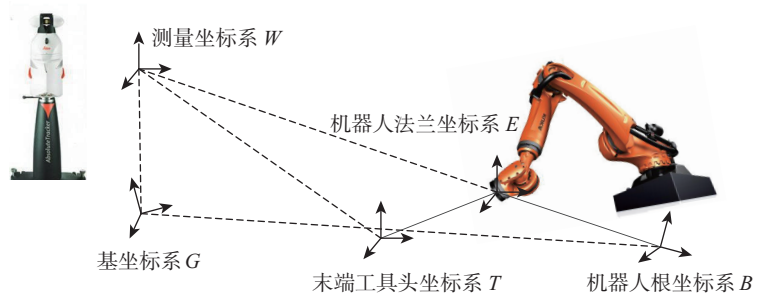


图4 坐标系组成

Fig.4 Composition of coordinate system

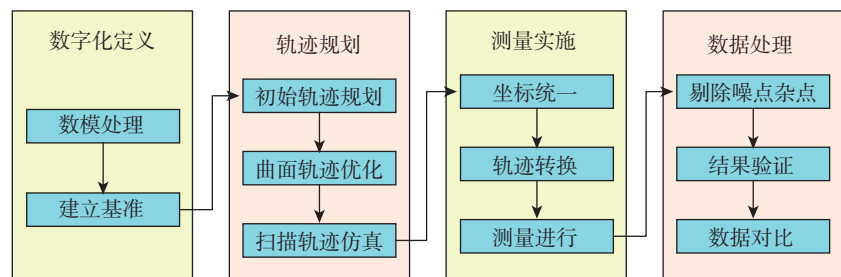


图5 系统工作流程

Fig.5 Process of scanning system

算法对曲面特征的轨迹进行优化。最后对轨迹进行仿真,保证轨迹无干涉和碰撞。

3 测量实施

测量实施的过程是按照规划的轨迹进行扫描测量。首先通过基准点测量,获得各个坐标系与测量坐标系之间的转换关系,完成坐标系的统一。接着打开之前规划的机器人扫描轨迹,并将轨迹从工件坐标系变换到机器人根坐标系。最后将轨迹传输到机器人控制柜,机器人根据控制点自动生成轨迹,完成测量。

4 数据处理

按照测量需求,剔除测量数据杂点和噪点,将数据与理论模型对比,对于型面特征,以理论规划点为基础进行点云数据的精简,以精简的测量数据与理论型面之间的偏差评价型面的加工质量。对于轮廓特征,分析轮廓特征及测量数据的结构特点,提出了一种基于线性扫描点云的轮廓特征点提取算法,实现了轮廓特征点的高精度提取。

机器人扫描系统轨迹规划

轨迹规划(Trajectory Planning)的任务是根据待测零件CAD模型生成机器人扫描系统工作轨迹。轨迹规划是自动扫描过程的关键组成部分,一方面规划轨迹需要满足测量设备的测量条件,充分发挥测量设备的性能;另一方面规划轨迹是提高测量精度与测量效率的关键因素之一。

1 初始轨迹规划

本文系统通过待测特征提取、路径生成、路径离散、扫描法向生成和轨迹计算与输出5个步骤,实现初始扫描轨迹规划,具体步骤如图6所示。

步骤1:特征提取。在CATIA中打开模拟件CAD模型,依次提取待测特征,并按照一定的特征命名原则,将特征名称挂到特征树下。本文以几何元素为依据,将飞机构件待测

特征概括为外形曲面特征、孔特征和边界特征。

步骤2:路径生成与离散。按照特征种类生成扫描路径,曲面特征扫描采用数控加工中的行切法,因此曲面的扫描路径由待测曲面的截面线组成,通过一组平行平面与待测曲面求交获得。孔与边界的扫描路径就是其边界交线。接着将上述路径等距离散为控制点。

步骤3:扫描法向生成。获取机器人扫描时末端法向,曲面特征的扫描法向为控制点处的曲面法向;孔和边界特征的扫描路径在两个面的交界处,其法向为控制点处两平面角平分线,为方便后续机器人扫描参数计算,在法向上固定距离处生成点,本文称之为法向点。

步骤4:轨迹计算与输出。通过计算获得各个特征扫描轨迹的机器人扫描参数,机器人扫描参数是机器人末端法兰坐标系与根坐标系之间的转换参数,轨迹规划时首先计算法兰坐标系与工件坐标系的转换参数,扫描参数由原点坐标和欧拉角组成,其格式为 $(x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$,经过计算后将各个特征的一系列扫描参数输出。

2 曲面轨迹优化

对于任何机器人系统,轨迹规划是一切工作的前提,合理的轨迹规划可以提高机器人系统的工作质量和效率。为了实现这一目的,工程中常用手段是分析机器人末端工具特性,并根据工具特性优化工作轨迹^[9]。考虑到激光扫描仪是一种光学仪器,即使满足了扫描约束条件,扫描仪相对于待测特征的不同位姿也会导致测量结果的变化。本文提出对测量仪器的测量误差进行研究和分析,并根据分析结果进行测量系统的轨迹优化,提高测量结果准确度。

本文中机器人扫描系统的工作对象主要是飞机蒙皮类零件,飞机蒙皮类零件曲面曲率变化不大,因此

T-Scan在曲面上的投影线可以简化为直线。

机器人扫描系统以不同的扫描深度、面外角和面外角扫描标准平面件,研究3个参数对测量误差的影响。每次扫描测试T-Scan都相对于标准平面件做平行运动,以保持扫描过程中位姿不变。扫描试验现场如图7所示。

试验结果表明,系统误差近似与扫描深度和面外角之间呈双线性关系。根据试验结果建立了系统误差预测模型:

$$E = 2 \times 10^{-5} (185.6 - d) (\psi - 10.3) + 0.091 \quad (1)$$

式中, d 为扫描深度,取值范围为120~180mm; ψ 为面外角,取值范围为 $-40^\circ \sim 50^\circ$ 。

从机器人运动学角度出发,以T-Scan扫描镜处的工具坐标系为基础,将姿态变换参数分解为扫描深度 d ,偏转角 γ ,俯仰角 β 和回转角 α (Scan Depth d , Yawing Angle γ , Pitching Angle β , Rolling Angle α)。

优化问题的四维决策空间为:

$$\left\{ x = (d, \gamma, \beta, \alpha) \mid d \in (120, 180), \gamma \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), \beta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), \alpha \in (-\pi, \pi) \right\} \quad (2)$$

同时轨迹优化问题的约束包括:接收镜约束、有效扫描宽度约束、面外角约束、面内角约束。那么轨迹优

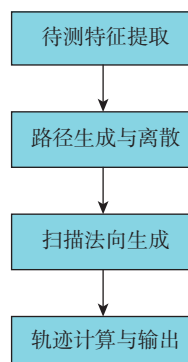


图6 初始扫描轨迹规划

Fig.6 Initial scanning trajectory planning

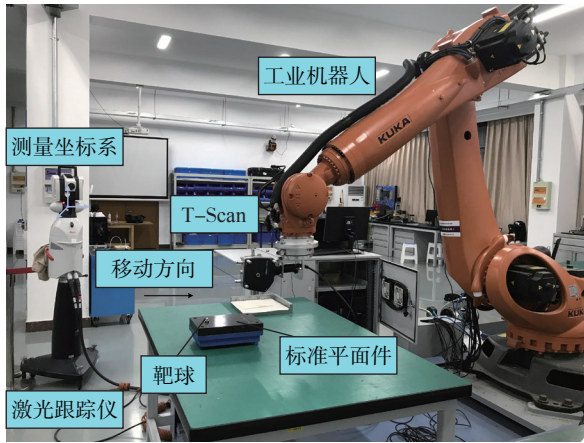


图7 试验现场图
Fig.7 Experiment equipment

化问题粒子群数学模型可以表述为:

$$\min E(d, \gamma, \beta, \alpha) = 2 \times 10^{-5} \times (185.6 - d) \times (\psi - 10.3) + 0.091 + k \times |\phi|$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \varepsilon_i \leq 40^\circ, i = 1, 2, 3, 4 \\ l_i \geq l_{\min}, i = 1, 2 \\ \psi \in [-40^\circ, 40^\circ] \\ \phi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}] \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 为 T-Scan 4 个接收镜的接收角; l_1, l_2 为有效扫描宽度; l_{\min} 为扫描宽度的取值范围, 根据行切宽度确定; ϕ_{\min}, ϕ_{\max} 为面内角的取值范围, 取决于扫描深度。

轨迹优化的意义在于, 通过粒子群算法可以快速找到满足扫描约束且系统误差最低的姿态, 最大程度上降低扫描系统误差, 提高扫描数据的精确度。

3 扫描轨迹仿真

为了防止扫描过程中发生碰撞和阻挡, 本文基于 DELMIA 环境对上述规划路径的扫描测量过程进行了仿真验证, DELMIA 是达索公司开发的面向数字化制造的仿真系统, 通过三维图形仿真实现可视化分析, 其包括虚拟现实仿真模块 (Envision)、装配过程分析 (DPM)、虚拟加工仿真 (VNC) 及机器人运动仿真 (Robotics) 等模块组成^[10], 强大的仿真分析功能在数字化设计制造领

域应用广泛, 本文主要利用机器人运动仿真模块。具体仿真步骤如图 8 所示。

步骤 1: 机器人选型。选用 KUKA 的六自由机器人, 机器人通过末端夹持装置加载激光扫描仪 T-Scan。

步骤 2: 构建测量仿真环境。

(1) 在“装配设计”工作台下, 完成蒙皮零件与夹具装置的装配, 以 Product 类型文件保存; 完成激光扫描仪与末端夹持装置装配同样以 Product 类型文件保存。

(2) 在“Device Building”工作单台下设置与激光扫描仪 T-Scan 固接的坐标系: Tool 坐标系与 Base 坐标系。Base 坐标系用来确定 T-Scan 与机器人末端之间的关系, 实现 T-Scan 安装至机器人的末端; Tool 坐标系确定扫描测量时激光扫描仪的位姿。

(3) 转换至“Device Task Definition”工作台下, 将上述文件导入, 此外还包括机器人升降底座、激光跟踪仪和工业机器人。建立并调整好机器人与 T-Scan 的位姿关系, 适当布置蒙皮零件与机器人的现场布局。激光跟踪仪根据零件与机器人的方位, 人为判定并在大体位置处放置, 必须保证其与 T-Scan 的光路联系。升降底座根据实际情况进行机器人的上下位置调整。通过上述方法, DELMIA 环境中机器人、蒙皮零件、夹具及激光跟踪仪等的现场布置如图 9 所示。

步骤 3: 测量路径点导入与路径仿真。本文直接利用离线编程模块将采用上述方法规划好的路径点集导入至仿真环境中规划路径点集, 导入仿真环境后, 驱动机器人夹持 T-Scan 按照规划路径进行扫描测量, 可以十分直观地观察到按照轨迹的扫描测量情况。

数据处理

为了实现测量点云数据的可视

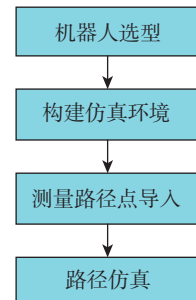


图8 扫描过程仿真
Fig.8 Scanning process simulation

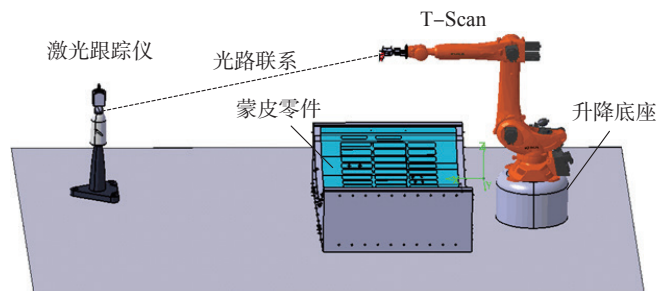


图9 测量现场基本布局
Fig.9 Measurement site layout

化显示与人机交互式处理,本文以 Visual Studio 2008 平台,基于 T-Scan 与 Spatial Analyzer(SA) 提供的二次开发接口开发了蒙皮外形测量处理辅助软件。

1 数据滤波与精简

实际扫描测量不可避免会产生一些噪声点、离群点。使用机器人夹持 T-Scan 进行扫描测量,运行比较平稳,噪点的类型主要为非型面特征的离群点与一些小尺度的噪声点。这些噪声点和异常点对出型面特征的误差评定有不利的影响,因此需要对获得的点云数据进行滤波。散乱点云数据滤波主要有双边滤波算法、拉普拉斯滤波算法及鲁棒滤波算法等,双边滤波算法通过平滑数据点的方式去除噪声点,容易使一些尖锐特征丢失,拉普拉斯算法是一种各向同性的去噪算法,对于分布不均匀的数据,多次迭代容易使点云发生扭曲产生较大的误差。而鲁棒滤波算法是通过核密度估计函数进行 Mean-shift 迭代对点云进行聚类,聚类点集能够很好地贴近原始曲面,比较适应于本文大尺度离群点与小尺度噪声点的去除(图 10)。

由于 T-Scan 点云采集具有高密度、高速度的特点,每秒的采样点数量高达 7000 点,因此测量所得的蒙皮外形型面的点云数量较大。庞大的点云数据为后续的数据分析带来极大的困难,为了有效提高型面测量数据的处理效率,同时又必须保证测量精度的要求,本文提出在理论规划点的基础上对测量点云进行精简提取,测量点精简提取可以转化为 K 近邻搜索的问题。本文是通过构建 K_d 树建立测量数据的索引关系,以此为基础实现 K 近邻点的搜索。

2 误差分析

飞机蒙皮外形加工型面与理论设计外形型面之间的误差,称之为加工制造误差。加工制造误差反映了飞机蒙皮外形型面的加工精度。传

统的精度评价方式是通过采用样板、模胎等人工比对的方式,其精度评价取决于人工经验,无法获得精确的数字量描述,效率较低,且受人为影响比较大。本文借鉴互换性中加工零件的形状误差的概念,给测量误差一个具体的数字量评定。互换性中的形状误差一般是通过面轮廓度进行评定,即实际曲面相对于理想曲面的允许波动值。通过上述提取的精简的型面测量点,采用离散测量数据与理论数模比对的方式进行精度评价:即将型面测量点向理论数模作投影,获取理论数模上的投影点,测量点与其投影点之间的有向矢量的大小,作为评价加工制造精度的指标。

将精简的点云数据与理论 CAD 模型进行比对分析,将计算的偏差结果以三维矢量的形式表示,超差区域与非超差区域可以得到清楚显示,图 11 中的蓝色与绿色部分分别表示超差区域与非超差区域,最终将数据分析报告输出。

结论

飞机大型结构件尺寸大、待测特征多、测量精度要求高,本文针对飞机大型结构件的外形数据的测量需求,构建了机器人扫描系统,并研究了自动化外形检测方法。本文从系统构建、流程构建、轨迹规划这 3 个角度介绍了机器人扫描系统的组成

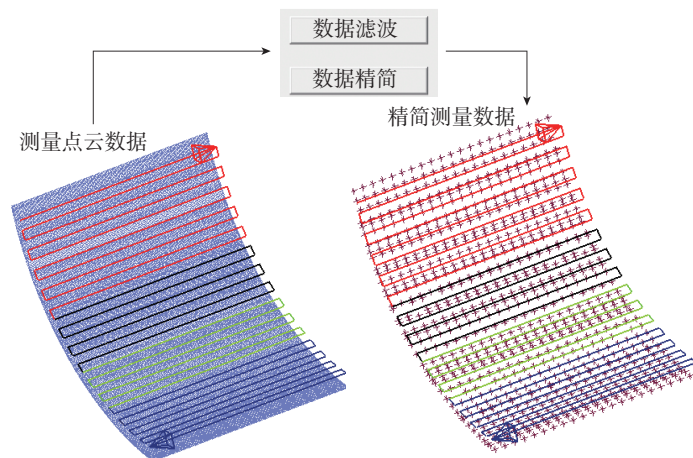


图10 数据精简与滤波
Fig.10 Data reduction and filtering

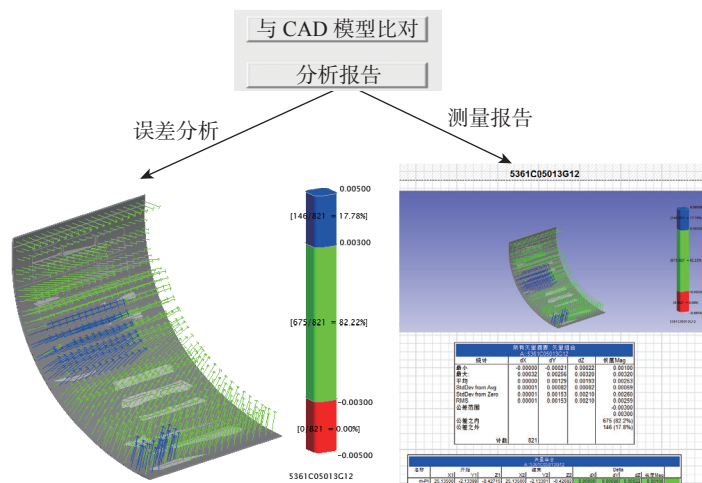


图11 误差分析
Fig.11 Error Analysis

和测量方法。首先根据大型构件的结构特点和测量需求选择合适的测量设备与载具将激光扫描仪安装在机器人末端,并开发了扫描控制系统中各个硬件;接着构建了一套机器人扫描系统的工作流程,介绍了轨迹规划的过程,在 CATIA 中规划机器人的扫描轨迹,并将轨迹按照一定的形式输出;最后为了验证轨迹规划的可行性,在 DELMIA 中对扫描轨迹进行仿真,介绍了测量数据的处理方法。根据上述方法,本系统可以实现飞机大型结构件的自动化扫描测量。

参 考 文 献

- [1] 岳胜,代多兵,安鲁陵. 飞机结构装配间隙超差分析与对策 [J]. 航空制造技术, 2013, 56(12): 81-84.
- YUE Sheng, DAI Duobing, AN Luling. Analysis and countermeasure for out-of-tolerance clearance in structural assembly of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(12): 81-84.
- [2] 杜娟. 飞机装配不协调问题的原因分析及解决方法 [J]. 中国高新技术企业, 2011(21): 114-116.
- DU Juan. Analysis and solution of uncoordinated problem in aircraft assembly[J]. China High Technology Enterprises, 2011(21): 114-116.
- [3] 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 path planning of scanning in aircraft wing assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [4] 袁菲菲. 基于激光跟踪仪的飞机机翼自动化扫描测量系统设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- YUAN Feifei. An automatic scanning system design of airfoil assembly based on laser tracker[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [5] 严成, 黄翔, 李泷杲, 等. 基于三维激光扫描的蒙皮对缝检测研究 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 70-74.
- YAN Cheng, HUANG Xiang, LI Shuanggao, et al. Research on detection of skin seam based on 3D laser scanning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 70-74.
- [6] 邹方, 薛汉杰, 周万勇, 等. 飞机数字化柔性装配关键技术及其发展 [J]. 航空制造技术, 2006, 49(9): 21-26.
- ZOU Fang, XUE Hanjie, ZHOU Wanyong, et al. Key technology of aircraft digital flexible assembly and its discovery[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(9): 21-26.
- [7] 吴问霆, 成思源, 张湘伟, 等. 手持式激光扫描系统及其应用 [J]. 机械设计与制造, 2009(11): 78-80.
- WU Wenting, CHENG Siyuan, ZHANG Xiangwei, et al. Handy laser scanning system and its application[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(11): 78-80.
- [8] 刘霜. 数字时代的跟踪仪最新测量技术与应用 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(7): 32-35.
- LIU Shuang. Latest metrology technology and application of the laser tracker in the digital age[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(7): 32-35.
- [9] 位洪军. 单线激光扫描三维测量技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- WEI Hongjun. Research on three-dimensional scanning technology with a single-line laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [10] 查弘文. 基于立体视觉的测量机器人的标定与测量规划 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- CHA Hongwen. Calibration and measuring planning of measuring robot based on stereo vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013.

通讯作者: 李泷杲, 副教授, 研究方向为飞机装配技术、数字化测量, E-mail: lishuanggao@nuaa.edu.cn。

Three-Dimensional Automatic Detection Method for Large-Scale Structure of Aircraft Based on Robot

CHEN Yunquan¹, LI Shuanggao², HUANG Xiang², LI Qi², LIN Jing²

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Shape detection is a vital part of aircraft assembly. Traditional measurement method based on analog delivering cannot meet the requirements of shape detection of large structures in aircraft assembly. It is difficult to detect large-size and complex structures with separate digital measurement equipment and methods. Therefore, this paper constructs an automatic scanning system consisting of industrial robot and laser tracker system, and studies the automatic detection methods for large-scale structures in aircraft assembly. According to the results of trajectory planning and simulation, the scanning system realizes measurement on large structures, and compares the measurement results with the theoretical digital model to analyze the error information of large structures and realize the detection of large structures.

Keywords: Aircraft assembly; Laser scanning; Large size measurement; Detection method; Robot

(责编 大漠)