

基于多源测量数据融合的间隙与阶差自动化测量技术研究*

杜福洲, 于 浩, 李 强

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 针对间隙与阶差数字化测量问题, 提出基于多源测量数据融合的间隙与阶差自动化测量技术, 给出一种采用视觉测量传感器与全向机器人辅助执行机构协同配合的测量方式, 并分析了系统组成。研究了该测量模式下的间隙与阶差测量工艺, 并给出了多系统集成框架与控制方法以实现测量数据自动采集。最后基于 QT 开发间隙与阶差测量软件, 并建立全向机器人测量平台进行试验验证。该研究为间隙与阶差高精度、自动化测量提供了技术支持和方法指导。

关键词: 自动化检测; 多源测量数据融合; 间隙与阶差; 多系统集成; 飞机装配

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.08.014



杜福洲

博士、副教授, 主要从事制造系统工程、数字化装配与测量技术应用研究及装备研发等。

飞机零部件装配关系复杂, 工装制造误差、零件制造误差、装配累计误差等因素均对装配质量产生影响,

制约飞机各项性能^[1-3]。为了保证飞机装配质量, 装配检测成为飞机制造的关键环节。衡量装配质量的指标之一为蒙皮间隙与阶差, 传统测量方式是用塞尺、卡尺、角规等进行手工测量, 存在效率不高、精度不稳定的问题, 飞机蒙皮装配间隙与阶差的测量迫切需要一种高效、精确的测量系统来实现数字化和自动化测量^[4]。

目前较为广泛应用的数字化测量设备有三坐标测量机、iGPS^[5]、经纬仪、激光跟踪仪、摄影测量仪、全站仪和激光雷达等^[6-7], 因其测量精度高、测量范围广的特性而用于飞机数字化装配过程中^[8], 可实现零部件位姿测量与型面扫描, 但无法精确测量局部间隙与阶差。结构光三维视觉测量^[9]是一种基于三角测量法原理的立体非接触式视觉测量技术, 可由带畸变的二维图像恢复为对应的三维坐标, 由于此方法解决了双目视觉匹配困难、易受环境因素影响的问

题, 逐渐被广泛采用。将光平面发射到蒙皮接缝间隙与阶差的表面上, 就可以利用激光点云的三维坐标拟合和计算出间隙与阶差, 实现局部的高精度数字化测量^[10-11]。

本文通过对数字化测量技术的研究, 提出基于一种覆盖面积广、适应性强的间隙与阶差数字化测量方法, 通过多源测量数据融合将局部高精度测量数据统一到广域数字化测量场中, 通过多系统集成实现测量数据自动采集, 并通过试验验证测量系统的有效性。

间隙与阶差测量系统应用场景及组成

基于多系统集成的间隙与阶差测量系统由总控计算机、测量软件系统、iGPS、工业机器人、全向车、视觉测量传感器和辅助柔性工装等组成。工业机器人和全向移动车组成全向机器人, 作为总体测量系统的执行

* 基金项目: 工信部民机专项(MJZ-2019-J-96)。

系统。全向机器人搭载视觉测量传感器、iGPS接收器和其他辅助设备,组成全向机器人测量平台;总控计算机的测量软件系统控制全向机器人测量平台进行数据采集,通过数据融合分析得出测量结果和测量报告。其应用场景如图1所示。

系统组成包括传感器测量系统、辅助执行系统、广域引导系统3部分,如图2所示。间隙与阶差测量系统具备一定柔性,可以根据不同的测量需求进行功能模块的配置和扩展。它将多个数字化测量仪器或辅助执行设备有机结合,通过多个系统分工合作,高精度、高效地完成采集和测量任务,并能有效分析数据精度和影响因素。

(1)传感器测量系统。选用小尺寸、近距离、非接触式的线结构光视觉测量传感器,外加电控开关、图像采集卡、图像驱动和具有开放端口的采集程序,共同组成了传感器测量系统。它能采集零部件接缝表面投射线结构光的三维坐标,通过自主开发的拟合算法运算之后,得出间隙与

阶差的数值,该系统负责间隙与阶差的直接测量任务。

(2)辅助执行系统。工业机器人和全向车组成全向机器人,作为主要的辅助执行机构,并辅以柔性工装,通过工业现场总线和通讯控制软件进行控制,构成辅助执行系统。工业机器人运动灵活、重复精度高,可调

整测量设备位姿完成测量作业。全向车能够实现测量执行机构的广域移动,扩展了近距离终端的测量范围。

(3)广域引导系统。广域引导系统选择iGPS,形成覆盖检测区域的数字化测量场,且具有较高的测量精度。将iGPS接收器靶球固定在全向机器人的特定位置,即可解算全向

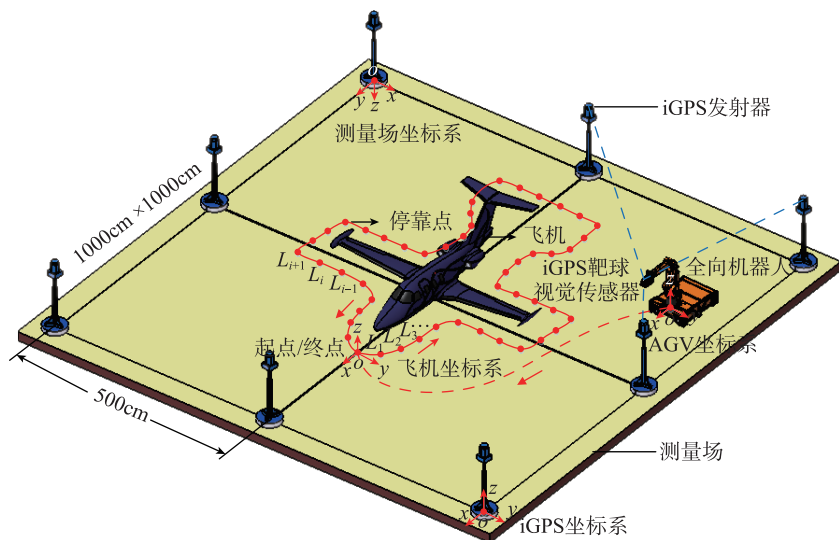


图1 间隙与阶差测量系统应用场景

Fig.1 Application scene of gap and step difference measurement system

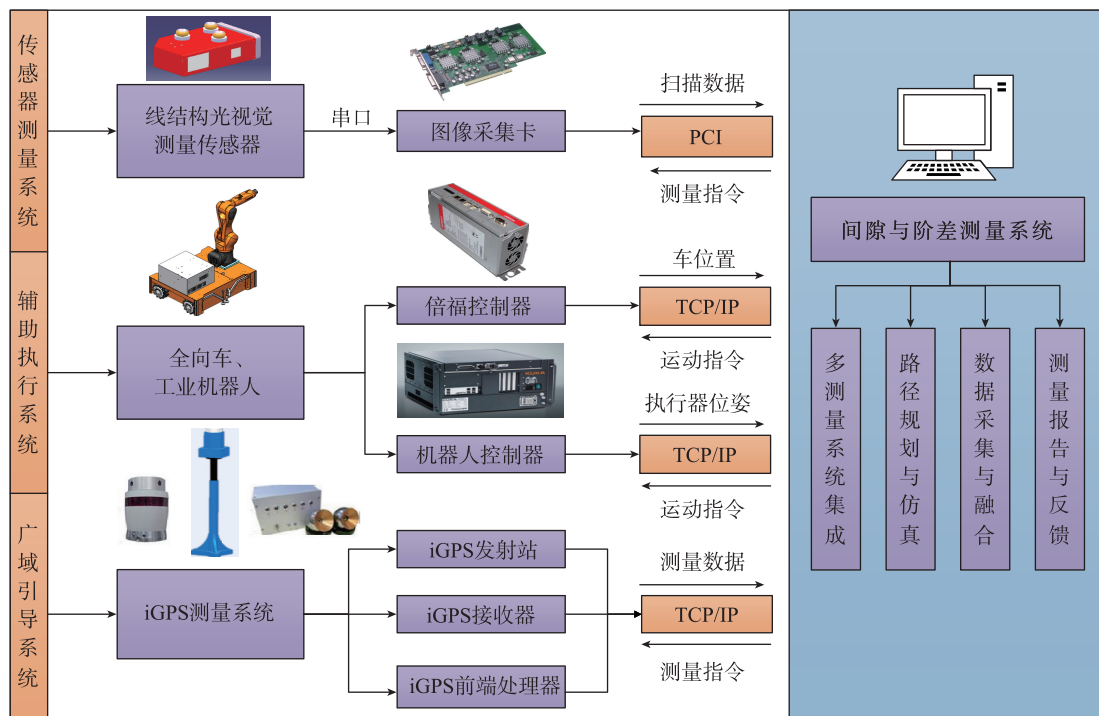


图2 间隙与阶差测量系统组成

Fig.2 Composition of gap and step difference measurement system

机器人在数字化测量场的位姿信息,对全向机器人进行路径规划和引导,并将传感器测量系统在各个位置采集的测量数据统一到相同坐标系下。

基于多源测量数据融合的自动化测量方法

为实现间隙与阶差的自动化测量,需进行飞机测量场构建、全向车路径规划、机器人离线编程、间隙阶差测量执行和数据与信息融合5个部分,如图3所示。

首先在Solidworks三维仿真环境下构建飞机检测任务模型,包含飞机模型、全向机器人测量平台模型及仿真形成的数字化测量场,之后开始iGPS预热、自标定与飞机坐标系联合标定工作,主要目的是规划测量点位置并依照飞机高度进行全局分层。在全向车路径规划和机器人离线编程阶段,主要根据测量点分布与系统测量能力确定全向机器人的广域运动路径和局域小空间内的动作轨迹,分别生成规划文件。在间隙阶差测量执行阶段,将规划文件转换成可被

全向机器人识别和执行的运动指令,开始广域移动和局域调姿,在iGPS的引导下,实时获知全向机器人位置和姿态,判断是否合理并进行相对位姿校正。当视觉测量传感器被全向机器人调至规划位姿后,进行间隙与阶差测量,并根据iGPS测量数据将测量结果统一至全局坐标系下,用于评价飞机零部件的装配质量。

视觉测量传感器由激光投射器、CCD相机和LED灯组成,可投射激光在零部件表面形成线结构光条纹,拍摄图像后可根据传感器内部参数求得图像中条纹点云在传感器坐标系下的三维坐标。利用线结构光视觉测量传感器测量平面零部件间隙与阶差的原理如图4所示,调整视觉测量传感器位姿使线结构光与缝隙垂直,之后进行测量数据采集。由于间隙与阶差的存在,线结构光在零部件表面分成两段,根据点云内相邻点间距离变化将点云分为两部分点集,利用最小二乘法拟合两条线段后,即可求得边缘点 P_i 与 P_{i+1} ,进而计算间隙与阶差。

当对曲面蒙皮进行检测时,在规划测量点位置阶段同时导出各测量点处法矢,在测量阶段将被测点法矢转换至传感器坐标系下,可分别生成过 P_i 与 P_{i+1} 的切平面。将两部分点集分别向对应切平面投影,即可将曲面间隙与阶差测量转换为平面间隙与阶差测量,按前述方法进行计算。

为将局域间隙与阶差测量数据统一到全局坐标系中,定义间隙与阶差的测量位置为零部件装配接缝中心位置,即图4中 $P_{i+1}O_i$ 的中点,可计算得到其在传感器坐标系下的坐标。在视觉测量传感器表面设有3个iGPS靶球,在传感器坐标系下的坐标已标定。通过iGPS实时测量靶球坐标,可基于罗德里格矩阵解算传感器坐标系与iGPS全局坐标系的转换关系,从而将间隙与阶差测量数据转换到全局坐标系下。

多系统集成框架与控制方法

间隙与阶差测量系统集成框架主要分为5个层次:应用表现层、业务逻辑层、软件层、信息层和物理层,

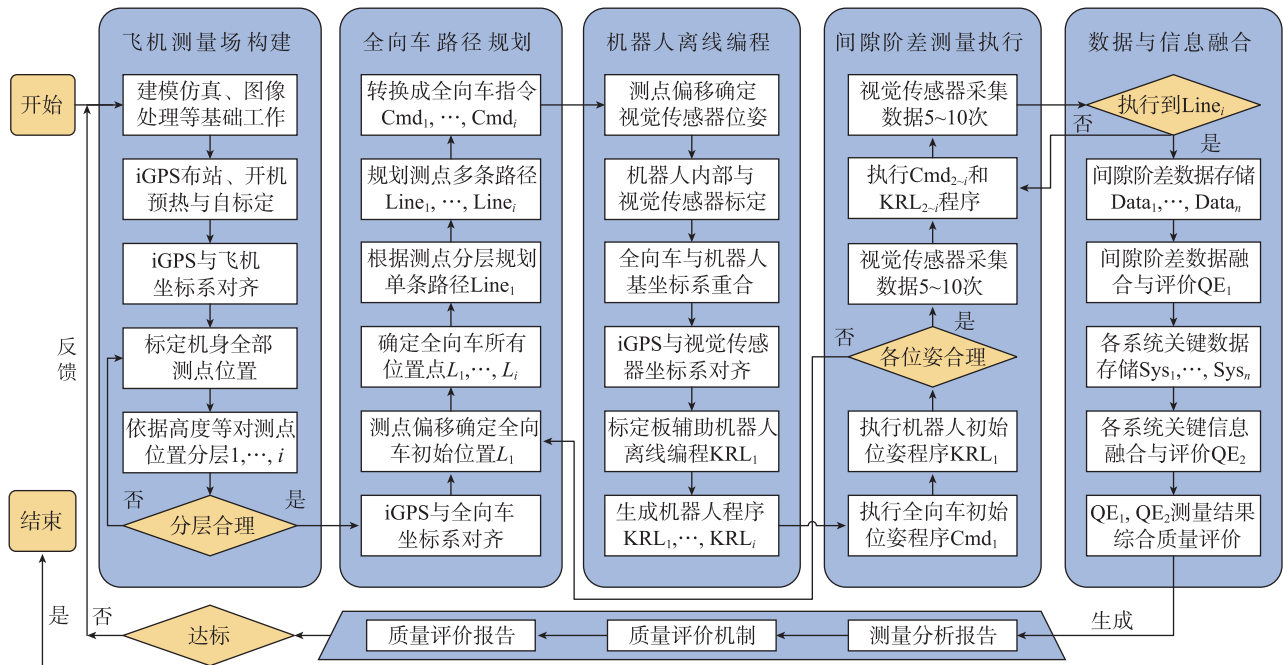


图3 基于多源测量数据融合的间隙与阶差测量工艺

Fig.3 Measurement process of gap and step difference based on multi-source measurement data fusion

如图 5 所示。应用表现层是将测量任务划分为测量场建模、路径规划、离线编程、蒙皮测量和数据融合 5 部分；业务逻辑层给出了详细的测量步骤以及测量系统要实现的功能；软件层给出了软件系统开发所涉及

到的技术要点和软件程序；信息层重点罗列了数据输入输出关系和数据文件格式；物理层是执行测量任务的设备，包括 iGPS、全向车、库卡机器人、视觉测量传感器和总控计算机。测量设备、辅助执行机构以及

iGPS 广域引导系统所对应的开放接口均集成到软件系统开发环境中，建立连接与通讯，并增加数据融合方法、坐标变换算法、拟合算法和协同转站技术，实现数据传输和结果导出的功能。通过多源数据处理、分析与评价可实现视觉测量传感器位姿解算和全向机器人当前运动航位推算，并能根据传感器由当前位姿到目标位姿所需的调整量，生成全向机器人路径规划与调姿轨迹规划。总控计算机与各子系统进行实时通讯，实现全向机器人测量平台的运动控制与数据采集，其集成与控制技术架构如图 6 所示。

对于全向机器人测量平台，由总控计算机通过 Profinet 现场总线的通讯方式与库卡机器人进行通讯，通过 TCP/IP 协议与全向车进行通讯，实现上位机对全向机器人测量平台的控制。机器人外接倍福的 C6920 主控制器和相关耦合单元 EL6695、EK1100，通过 TwinCAT 组态软件的

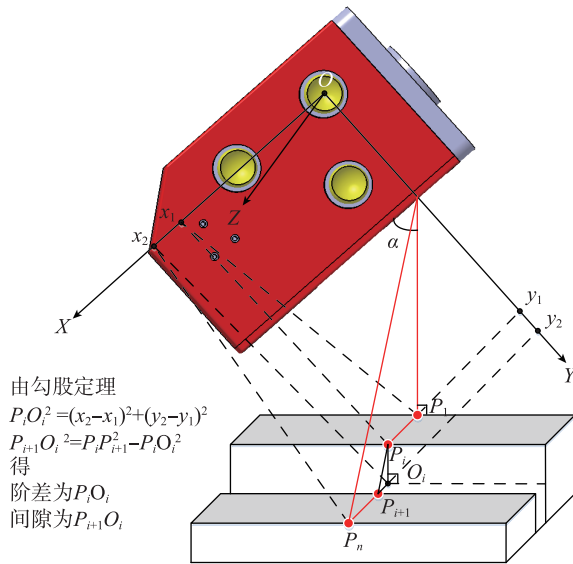


图4 间隙与阶差测量原理

Fig.4 Measurement principle of gap and step difference

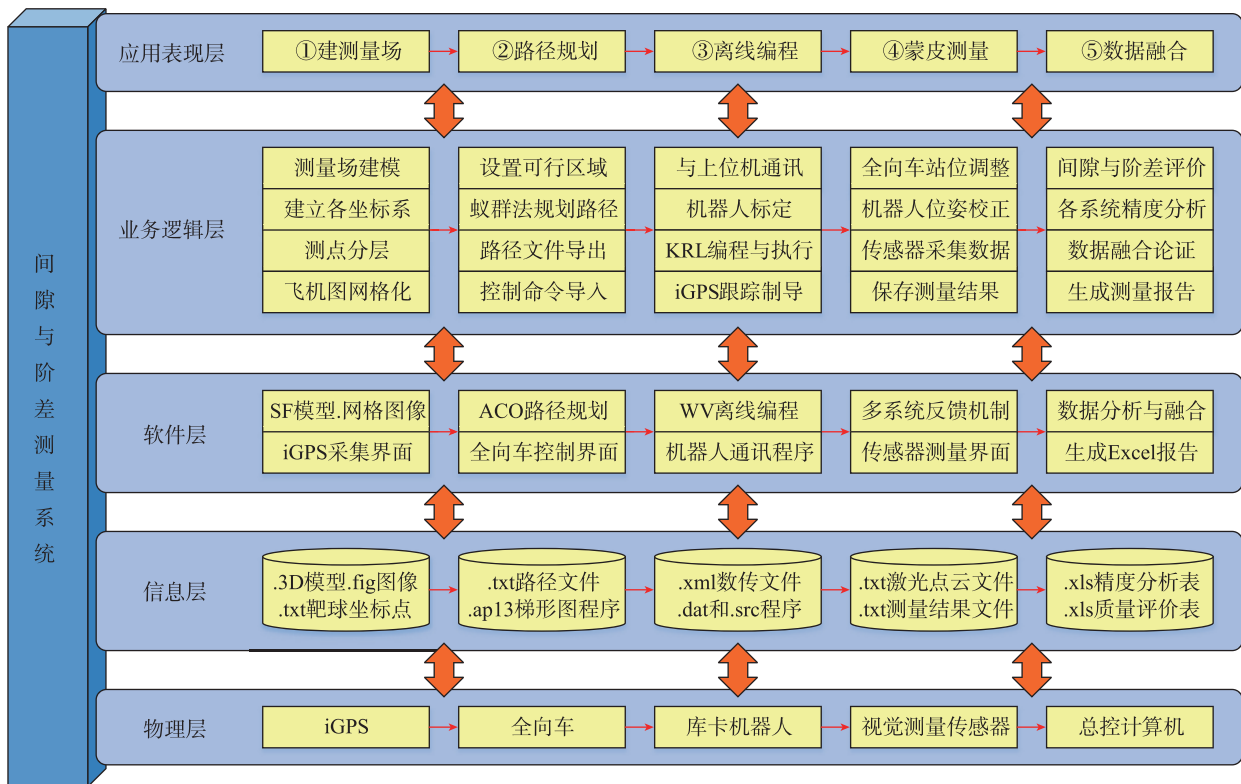


图5 间隙与阶差测量系统集成框架

Fig.5 Integration framework of gap and step difference measurement system

编程,实现“上位机对机器人的一段或多段程序执行”、“当前位置和姿态显示”、“发送脉冲指令对各个轴进行信号采集与单独运动控制”等功能。全向车由总控计算机直接控制,通过TCP/IP通讯方式网线连接,使得全向车能够实时执行上位机输入的程序,按照预定轨迹移动多段距离。

系统开发与试验

为验证本文所设计的测量系统,在QT开发环境下自主开发间隙与阶差测量软件(ARMS-自动化机器人测量系统),进行功能验证。该软件系统实现了多系统通讯连接、数据采集与计算、多源测量数据融合与分

析等功能,对多系统的集成控制提高了操作效率和测量精度。间隙与阶差测量软件主界面如图7所示。

建立图8所示试验场景进行平面零部件间隙与阶差测量功能验证,其中工件模型采用航空铝试块,模拟蒙皮间隙的尺度加工间隙与阶差,并对所有表面进行氧化处理,减小反光

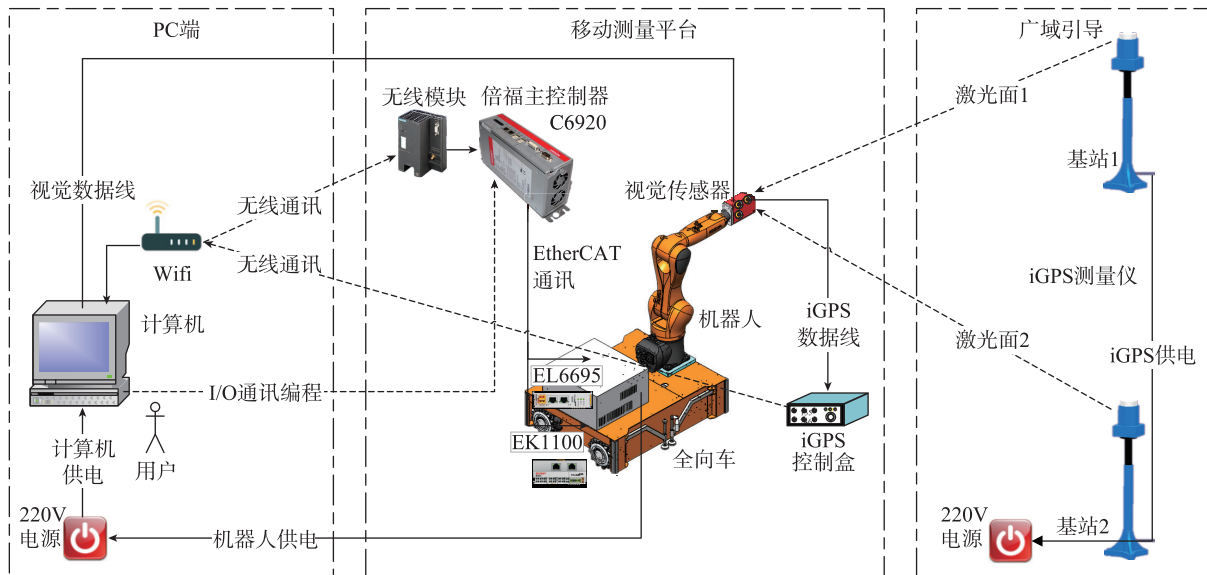


图6 多系统集成与控制架构

Fig.6 Multi-system integration and control architecture

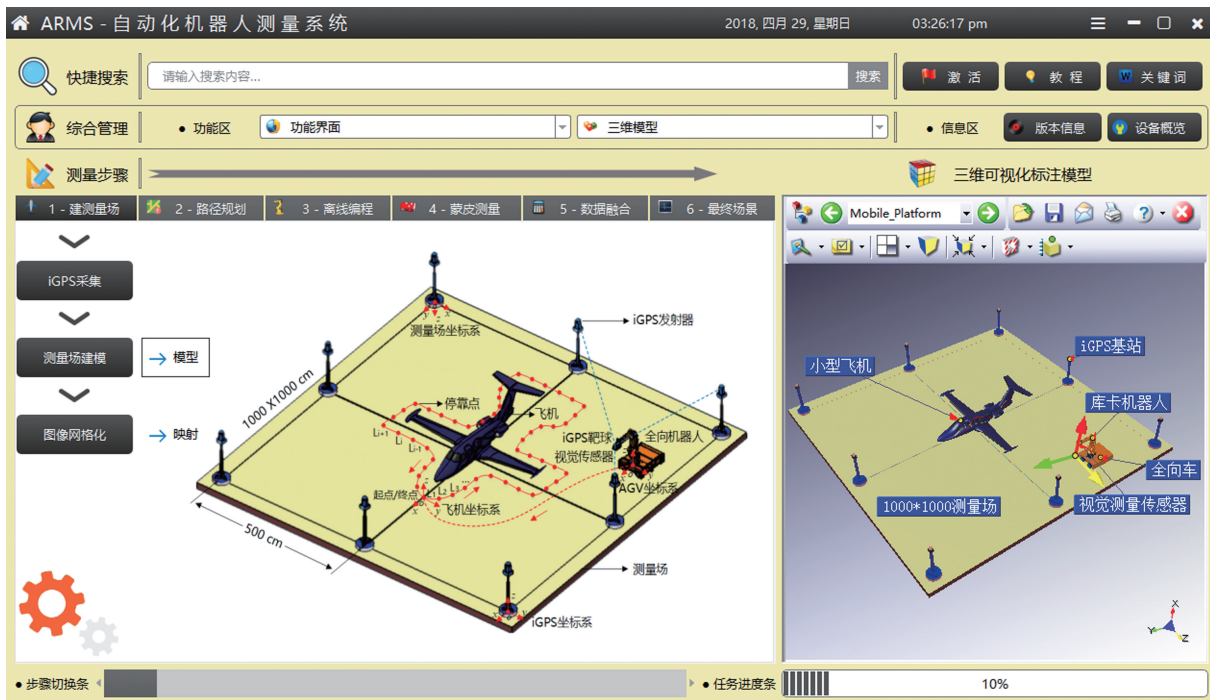


图7 间隙与阶差测量软件主界面

Fig.7 Main interface of gap and step difference measurement software

干扰因素的影响,保证视觉测量传感器的测量精度。所用库卡机器人的重复定位精度为±0.03mm,线结构光视觉测量传感器的测量分辨率为0.02mm。

对工件上1.50mm的间隙与1.00mm的阶差在单一位置进行10次测量,测量结果如表1所示。间隙测量均值为1.5563mm,标准差为0.0447mm;阶差测量均值为1.0447mm,标准差为0.0298mm。间隙与阶差位置坐标在传感器坐标系下为(114.4075, 281.7060, -56.4196),转换至iGPS全局坐标系下,坐标为(12092.9267, 3717.2710, 1565.1049),证明系统可实现局部高精度测量,并将测量结果转换至全局坐标系。

融合多源测量数据后的测量精度包括两部分,一是间隙与阶差位置测量精度,二是间隙与阶差数值测量精度。为进一步评价间隙与阶差测量系统可靠性,由全向机器人测量平台在5个不同位置测量2.00mm的间隙、1.00mm的阶差,每个位置测量20次。

位置测量精度通过间隙与阶差位置坐标由传感器坐标系转换至全局坐标系后的标准差衡量,由视觉测量传感器与iGPS的测量精度共同决定。设位置标准差 $\sigma = \sqrt{\sigma^2(x) + \sigma^2(y) + \sigma^2(z)}$,其中 $\sigma(x)$ 、 $\sigma(y)$ 、 $\sigma(z)$ 分别为该方向坐标值的标准差,在5个测量位置,视觉测量传感器位置测量标准差均小于0.05mm,iGPS各靶球坐标测量标准差均小于0.2mm;通过数据融合将每次测量结果均转换至全局坐标系下,间隙与阶差的位置测量标准差均小于0.45mm。

为评价间隙与阶差数值测量精度,将5个测量位置间隙与阶差测量值的均值、标准差和最大偏差整理如表2所示。

由表2中最大偏差可知,间隙与平均值的最大偏差不得超过0.08mm,阶差与平均值的最大偏差不得超过

0.008mm,证明了测量的稳定性。由于测量系统误差、测量噪声以及工件加工误差的存在,测量值相对于理论值有一定偏差,其中测量系统在测量时需要使视觉测量传感器结构光与缝隙垂直,而传感器位姿是由iGPS进行测量后通过机器人调整的,因此间隙与阶差数值测量精度与视觉测量传感器、iGPS的

测量精度和机器人定位精度均有关。根据某型号飞机间隙与阶差检测技术要求,蒙皮接缝间隙与阶差不超过10.00mm时,测量误差要求为间隙不超过0.50mm,阶差不超过0.10mm,表2中实测间隙均值与理论值偏差小于0.30mm,阶差均值与理论值偏差小于0.10mm,满足测量技术要求。



图8 现场测量试验场景

Fig.8 Verification environment of gap and step difference measurement

表1 单一位置间隙与阶差测量数据

Table 1 Measurement data of gap and step difference at single position mm

序号	间隙	阶差
1	1.5492	1.0811
2	1.5493	1.0831
3	1.5493	1.0787
4	1.6715	1.0583
5	1.5503	1.0328
6	1.5502	1.0329
7	1.5503	1.0310
8	1.4896	1.0416
9	1.5519	1.0038
10	1.5518	1.0036

表2 不同位置间隙与阶差测量精度

Table 2 Measurement accuracy of gap and step difference at different positions mm

位置序号	均值		标准差		最大偏差	
	间隙	阶差	间隙	阶差	间隙	阶差
1	1.8158	0.9723	0.0342	0.0040	0.0729	0.0023
2	1.9034	1.0263	0.0215	0.0083	0.0240	0.0076
3	1.8288	0.9795	0.0673	0.0040	0.0485	0.0036
4	1.8123	1.0667	0.0410	0.0042	0.0745	0.0043
5	1.7227	1.0191	0.0089	0.0031	0.0183	0.0041

结论

本文研究了基于多源测量数据融合的间隙与阶差自动化测量系统,提出了一种基于全向机器人测量平台的测量模式,分析了其系统组成。在此基础上,给出了基于多源测量数据融合的间隙与阶差测量工艺,以及测量过程中各系统的集成框架与控制方法。最终开发软件系统,建立试验环境,对上述研究内容进行了验证。本文研究为间隙与阶差高精度、自动化测量提供了技术支撑和方法指导。

参考文献

[1] 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(7): 114-116.

DU Juan. Reasons analysis and solutions to the problem of uncoordinated aircraft assembly[J]. China High-Tech Enterprises, 2011(7): 114-116.

[2] CHEN Z H, DU F Z, TANG X Q. A framework of measurement assisted assembly for wing-fuselage alignment based on key measurement characteristics[J]. International Journal of Manufacturing Research, 2015,10(2): 107-128.

[3] 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.

[4] 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 of aircraft skin appearance automatic inspection technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[5] 王伟, 李锡文, 刘继双. 室内GPS的原理与应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2010, 33(3): 116-119.

WANG Wei, LI Xiwen, LIU Jishuang. The principle and application of indoor GPS[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2010, 33(3): 116-119.

[6] SAVIO E, CHIFFRE L D, SCHMITT R. Metrology of freeform shaped parts[J]. CIRP Annals, 2007, 56(2): 810-835.

[7] SON S, PARK H, LEE K H. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(8): 889-897.

[8] 杜福洲, 文科. 大尺寸精密测量技术及其应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(11):

16-24.

DU Fuzhou, WEN Ke. Large-scale precision measurement technology and its application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(11): 16-24.

[9] 汤明辉, 程筱胜, 崔海华, 等. 面向结构光三维测量的高稳定映射拼接方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 165-170.

TANG Minghui, CHENG Xiaosheng, CUI Haihua, et al. A high stability mapping stitching method for structured light three-dimensional measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 165-170.

[10] 张卡. 面向飞机蒙皮接缝的线结构光检测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

ZHANG Ka. Study of detecting aircraft skin joint based on structured light vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[11] 许大帅, 杜福洲. 基于线结构光的飞机蒙皮接缝阶差与间隙测量技术研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 77-81.

XU Dashuai, DU Fuzhou. Research on measurement technique of the stepped difference and gap between aircraft skins based on linear structured light[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 77-81.

通讯作者: 杜福洲, E-mail: du_fuzhou@163.com.

Research on Gap and Step Difference Automatic Measurement Technology Based on Multi-Source Measurement Data Fusion

DU Fuzhou, YU Hao, LI Qiang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Aiming at digital measurement of gap and step difference, a measurement technology based on multi-source measurement data fusion was proposed. The measurement method using vision measurement sensor and omnidirectional robot assisting actuator was presented and the measurement system composition was analyzed. Based on the research, measurement process based on measurement data fusion was proposed. In order to measure automatically, multi-system integration framework and control method was studied. Finally, a QT-based gap and step difference measurement software and omnidirectional robot measurement platform was designed and developed to carry out verification. The research provides technical support and methodological guidance for automatic and high-accuracy measurement of gap and step difference.

Keywords: Automatic inspection; Multi-source measurement data fusion; Gap and stepped difference; Multi-system integration; Aircraft assembly

(责编 海山)