

飞机大型复杂构件三维数字化 协同测量方法研究*

赵建国, 刘新宇, 于思阳

(航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110034)

[摘要] 针对飞机大型复杂整体结构件装配对测量技术的差异化需求,开展了基于 Metronor 双相机跟踪系统、手持式光笔和 Aicon 扫描仪的协同测量方法研究,给出了手持式光笔和三维跟踪扫描测量的技术方案,省去了反光标识点粘贴和去除工作,并在 $4\text{m} \times 3\text{m} \times 2\text{m}$ 空间内进行了工艺测试,测量误差不超过 0.075mm ,可实现内部隐藏特征、孔位信息、轴线、配合型面、气动外形和间隙阶差的测量,满足了飞机装配大型复杂结构件装配的三维数字化测量需求。

关键词: 飞机装配; 结构件; 协同测量; 跟踪扫描; 手持式光笔

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.05.055



赵建国

博士、高级工程师,研究方向为数字化测量与柔性装配。

现代军用飞机在隐身性、机动性和使用寿命等方面要求越来越高。总体布局要综合考虑气动特性和隐

身特性,同时减少零件和标准件连接数量,这样不仅减轻飞机重量,而且可以提高机体疲劳强度,因此大型整体复杂结构件应运而生。大型整体复杂结构件要求精度高、制造难度大,数字化测量技术在装配工艺流程控制中必不可少,为保证飞机的高性能,亟须发展三维数字化协同测量技术,以满足大型复杂整体结构件装配过程对测量技术的差异化需求。

在传统制造中,飞机气动外形测量的检测工具一般为卡板,间隙和阶差依靠塞尺测量,飞机表面沉头孔(包括铆钉孔和螺栓孔)窝深测量主要采用窝量规。上述技术手段均为模拟量检测,依靠工人肉眼判断,检测精度与工人经验有关,测量准确度较低,只能定性分析飞机部件装配误差,不能满足现代飞机的研制需求。随着飞机的更新换代,数字化测量已融入飞机制造的各个环节,应用模式也由质量检测向工艺过程控制转变。以激光跟踪仪、激光雷达、摄影测量、

便携式坐标测量等为代表的大尺寸测量技术的广泛应用^[1-2],显著提高了飞机制造精度,大大缩短了制造周期。国内飞机制造企业、研究院所在引进先进测量设备的同时,也面向飞机复杂结构件制造开展了数字化测量技术研究。文献[3]、[4]采用摄影、结构光扫描和光笔等设备协同测量,以相互兼容的标识点作为不同设备间数据融合的桥梁,实现复杂装配部件的三维数字化测量;文献[5]基于 EMSCON 实现了多台激光跟踪仪协同工作,有效提高了测量范围和效率;文献[6]采用双 CCD 相机,结合三角法立体成像原理获得物体表面密集点云的三维坐标,实现了表面细节特征的测量,但由于视野限制,大面积测量需通过粘贴编码点和反光标识进行图像缝合,编码点和反光标识的粘贴和去除工作量大,而且容易遗漏,影响飞机的飞行性能和安全。

针对飞机大型整体复杂结构件装配的测量工艺需求,开展基于光学

* 基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ240423)。

跟踪、三维扫描和手持式光笔的协同测量技术研究,实现飞机交点孔、轴线和型面的数字化测量,对促进大型复杂结构件装配工艺的持续改进、增强新一代飞机快速研制能力、提高航空工业核心竞争力至关重要。

三维数字化协同测量

针对飞机大型整体件结构复杂、自身遮挡严重,以及各部位差异化的特点,本文结合光学跟踪、三维扫描和手持式光笔测量技术,解决了多视角扫描数据缝合误差累积问题,而且省去了编码点、测量反光标识的粘贴和清除工作,实现了飞机复杂结构件的大尺寸、高精度及快速测量。

1 协同测量方案

飞机大型整体复杂结构件的测量特征包括交点孔位置度与同轴度、配合型面、气动外形和间隙阶差等,而且有些待测特征位置隐蔽。数字化测量手段种类繁多,适用范围和性能指标差异较大,很多场合单一设备无法满足全部测量需求。本文研究的三维数字化协调测量方案如图1所示, Metronor 双相机跟踪系统提供全局基准,手持式光笔主要用于内部隐藏特征、孔位信息和轴线的测量。三维扫描仪需要加装定位笼形架,使用前要进行标定,它能自动完成多幅图像的缝合,实现配合型面、气动外形和间隙阶差的测量。与其他摄像技术不同, Metronor 双相机只识别LED光靶,测量主要通过手持式光笔实现,所以亟待解决的是手持式光笔和三维扫描仪的数据融合。圆度精度较高的亚光球(直径不限)可被两者识别,通过球心坐标对齐实现数据基准的统一,待数据融合后,借助POLYWORKS等软件,采用最佳拟合或是特征对齐等原则与CAD模型匹配,进而完成飞机复杂结构件的三维数字化综合测量与评价。

Metronor 双相机跟踪系统包括两个高精度 CCD 工业数码相机,使

用时,在测量空间内沿宽度和深度方向放置参考棒(参考棒上布置多个位置关系确定的发光标识),按照图2所示放置,并保证其覆盖整个测量场。利用二维光学成像模型,建立一个以相机固有成像参数(内参数)、双相机位姿参数(外参数)及参考棒标识点坐标为优化变量的整体优化目标函数,进而通过非线性优化方法解算出两相机间位姿参数。Metronor 双相机跟踪系统 6m 范围内测量精度可达 0.08mm (2σ)。

2 光笔接触测量

光笔测量系统包括手持式光笔

(设有多个 LED 光靶)和测头,如图3所示。使用前进行标定,获得测头与光笔上的各反光目标点之间的相对位置。测量时,先通过球形测头与被测部位接触,双相机跟踪系统对光笔进行拍摄并获取图像,再通过 LED 光靶图像的分析和解算获得测头中心的三维坐标,自动将其变换到全局坐标系中。为方便各种孔及内部隐藏位置的测量,测头配有多种形式,使用前均已标定,并形成内部参考库,利于坐标的解算与法向补偿。

3 三维跟踪扫描测量

小型零件扫描一般采用粘贴反

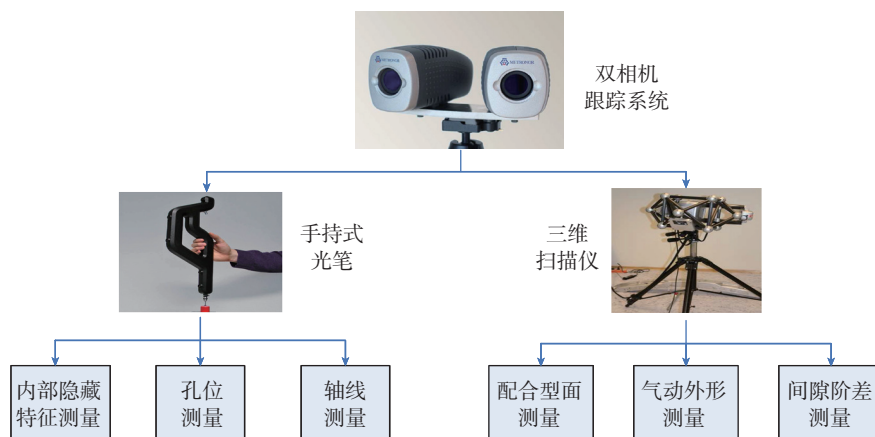


图1 三维数字化协同测量方案

Fig.1 Scheme of 3D collaborative measurement

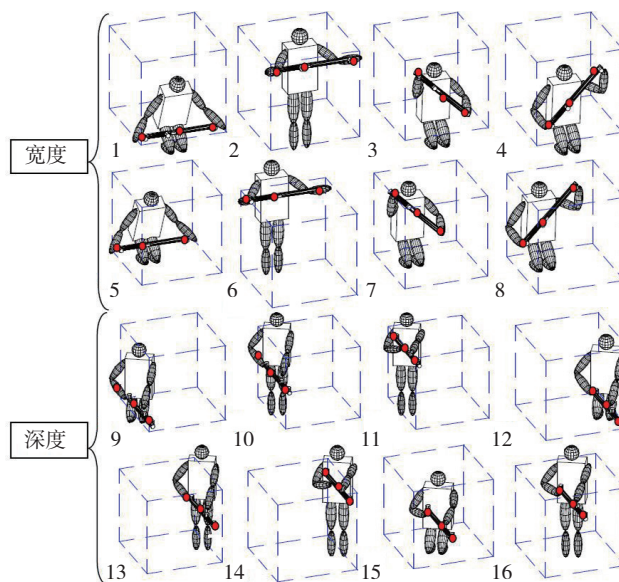


图2 Metronor双相机跟踪系统标定

Fig.2 Precision calibration of measure for Metronor dual-camera tracking system

光标识点进行图片缝合,若每次测量视场内 有 3 个以上公用标识点,测量数据便可自动转换至全局坐标系,测量误差约 0.03mm (2m 以内),但对大型部件此法误差较大。相关试验显示,测量两端设有 1.5in 亚光球的标准尺,测量由一端开始,经任意一段 4m 长路径,路径上粘贴反光标识点,终止于标准尺另一端,首尾测量不闭合,经计算球心距偏差 0.2mm 以上,不能满足大型结构件的测量要求。三维跟踪扫描系统(图 4)包括 Aicon 扫描仪和定位笼形架, Aicon 扫描仪用于采集待测部件点云数据,定位笼形架提供图片缝合的对齐依据。为增加跟踪定位成功概率,在定位笼形架上布置大量 LED 光靶,保证各个角度均能被 Metronor 双相机识别。

Aicon 扫描仪基于双面视觉原理,中部的光栅投影器向被测物体表面投射光栅条纹,并采用两个 CCD 摄像机同步拍摄被测物体表面结构光场,通过对调制过的经由物体表面结构光场图像的分析,结合三角法立体成像原理获得物体表面密集点云,以此获得物体表面丰富的细节特征和复杂曲面的三维坐标数据。

Aicon 扫描仪两侧高分辨率相机使用前采用标准板进行校准,其原理已有大量学者研究,算法成熟,最终确定其内部坐标系 O_1 。笼形架仿照原子结构,如图 4 (a) 所示,球形构件上布置多个 LED 光靶,各球形构件通过碳纤维杆连接,刚性和热胀系数均满足测量要求,各 LED 光靶相对位置关系和局部坐标系 O_2 已标定,并定期校准。实际测量时需先将 O_1 转换到 O_2 ,然后再由 O_2 转换至 Metronor 双相机跟踪系统坐标系 O 中,实现多幅图像测量数据的缝合。首先应确定 O_1 中点 $P_1(x_1, y_1, z_1)^T$ 到 O_2 中点 $P_2(x_2, y_2, z_2)^T$ 的转换关系,模型如公式(1)所示,其中符号具体表述见文献 [7]。

$$P_2 = R_1 P_1 + T_1 \quad (1)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} c\theta c\varphi & c\theta s\varphi & -s\theta c\varphi & c\theta s\theta c\varphi + s\theta s\varphi \\ s\theta c\varphi & s\theta s\varphi & c\theta c\varphi & s\theta s\theta c\varphi - c\theta s\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix}$$

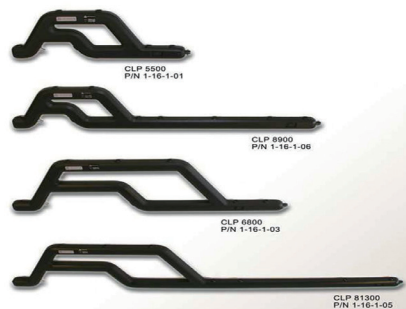
$$T_1 = [a_1, b_1, c_1]^T$$

式中, R_1 为旋转变换阵, T_1 为平移变换阵, θ 代表横滚角、 φ 代表俯仰角、 φ 代表偏转角, a_1 为 x 向偏移, b_1 为 y 向偏移, c_1 为 z 向偏移。 c 表示 \cos , s 表示 \sin 。欲求解公式(1)需要 3 点坐标,为减少测量误差影响,一般测量点数应大于 3,利用最小二乘法求解。

P_2 到 P 的转换关系,模型如公式(2)所示,参数与公式(1)相似。

$$P = R_2 P_2 + T_2 \quad (2)$$

实际标定如图 5 所示,借助 Metronor 双相机跟踪系统,固定 3 个亚光球,其坐标采用手持式光笔测量,作为已知条件,将笼形架与 Aicon 扫描仪固连。标定过程分 3 次从不同角度扫描 3 个亚光球, Metronor 双相机跟踪系统记录笼形架位姿参数, Aicon 扫描仪采集 3 个亚光球数据,综合 3 次测量数据采用最小二乘法,解算出 P_1 到 P_2 的坐标转换关系,确



(a) 手持式光笔



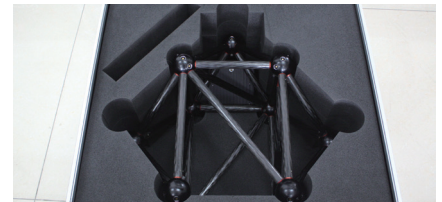
(b) 测头组件

图3 光笔测量系统

Fig.3 Components of hand-held light pen

定 R_1 个 T_1 。

在实际测量过程中,三维扫描的同时 Metronor 双相机跟踪系统记录定位笼形架上 LED 光靶坐标信息,进而通过最小二乘法确定 R_2 个 T_2 。最后结合公式(1)和公式(2)将三维扫描数据转换至 Metronor 双相机跟踪系统坐标系中,完成多幅扫描数据的融合。



(a) 定位笼形架



(b) Aicon 扫描仪



(c) 组合后系统

图4 三维跟踪扫描系统

Fig.4 3D tracking scanner



图5 Aicon扫描仪与笼形架标定

Fig.5 Precision calibration of Aicon scanner and cage frame

在大型结构件测量时,双相机跟踪系统提供缝合基准,扫描位置随意,两幅图片无须重叠区域,显著提高了测量精度和效率,而且节省了大量标识点的粘贴和去除工作。点云数据采集后,可进行配合型面、气动外形和间隙阶差的误差分析。

测量工艺验证与工程应用

1 工艺验证

三维光学测量系统精度验证方法已形成多种标准,按文献[8]~[10]采用标准长度尺,规定了空间单一方向上的标准长度,使用测量仪器对标准长度尺进行测量,将得到的测量结果与标准器的标定长度进行比较,从而验证测量仪器的精度。

如图6所示,标准长度尺尺身采用空心碳纤维杆,可以显著减小标准尺长度受环境温度变化的影响,并减轻标准尺的重量,防止标尺变形。尺两端各布置直径38.1mm的球形目标,两目标球的中心距为标准尺长度 $L=1028.152\text{mm}$,不确定度 $U=0.01\text{mm}$,包含因子 $k=2$ 。标准长度尺为一维,单次测量只能给出一个长度参考,为验证三维测量精度,需在测量场内将标尺在空间多个位置多个方向上进行安置(图7),按水平、竖直和纵深3个方向放置标尺。

测量工艺验证现场环境温度为 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$,相对湿度为50%~70%,验证前所有测量仪器及附件在验证现场放置时间超过12h,设备预热时间不少于1h。对Metronor双相机跟踪系统、手持式光笔及测头、笼形架和Aicon扫描仪进行校准和标定,以确定设备均满足使用要求。标准长

度尺经三坐标测量机检验有效。测量场范围为 $4\text{m} \times 3\text{m} \times 2\text{m}$,如图7所示,经现场实际测量,取3个方向中误差最大值,测量精度对比见表1。

由表1数据可见,在 $4\text{m} \times 3\text{m} \times 2\text{m}$ 空间内,采用手持式光笔和三维跟踪扫描两种测量手段,测量误差最大为 0.075mm ,满足飞机大型复杂结构件装配的三维数字化测量需求。受双相机测量原理限制,测量误差会随测量距离的增加而增加,在开展实际测量工作时,应合理布置相机,标定区域应包络被测工件。此外,受相机交汇角影响,测量时应尽量避开在相机识别区边缘采集数据,如图7中 P_7 和 P_9 位置。

2 工程应用

飞机前机身结构最为复杂,且装配精度要求最高,下面以某型飞机前机身座舱为应用案例,采用三维数字化协同测量方法,完成装配质量的过程控制和检验验收。前机身测量区域尺寸约 $4\text{m} \times 2.5\text{m} \times 1.8\text{m}$,结合Metronor双相机和手持光笔,以机身上关键特征孔、定位孔和基准面为测量基准,建立飞机坐标系。对于关键传感器安装接口、操作机构连接孔、舱盖交点孔等隐藏特征,采用手持式光笔测量。气动外形和配合型面采用扫描仪测量,通过Metronor双相机跟踪系统实现图像的缝合。经工程验证,测量结果与实际状态相符,单次测量实现了前机身装配精度的全面检测,有效指导了现场装配工作,提高了飞机装配质量和效率。所以,三维数字化协同测量方法的应用,促进了飞机装配工艺改进,为飞机大型复杂整体结构件装配质量的综合评

估提供了有效方法和数据支持。

结论

针对飞机大型复杂整体结构件装配需求,提出了基于Metronor双相机跟踪系统、手持式光笔和Aicon扫描仪的协同测量方法,统一了测量基准,实现了测量数据的无缝融合。测量误差不超过 0.075mm ,满足飞机装配大型复杂结构件装配的三维数字化测量需求。

对于尺寸在 $4\text{m} \times 3\text{m} \times 2\text{m}$ 以内的大型结构件,Metronor双相机跟踪系统提供全局基准;手持式光笔可实现内部隐藏特征、孔位信息和轴线的测量;Aicon三维扫描仪加装定位笼形架,不必粘贴反光标识点,可自动完成多幅图像的缝合,实现配合型面、气动外形和间隙阶差的测量。对

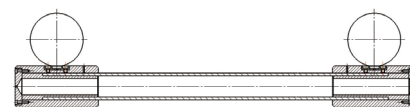


图6 标准长度尺

Fig.6 Standard length ruler

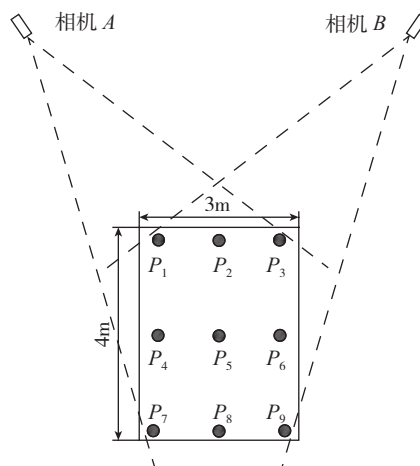


图7 标准长度尺布置方式

Fig.7 Layout of standard length ruler

表1 测量精度对比

mm

测量仪器及参数	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	
手持式光笔	测量长度	1028.188	1028.134	1028.124	1028.135	1028.12	1028.201	1028.201	1028.099	1028.213
	偏差	0.036	-0.018	-0.028	-0.017	-0.032	0.049	0.049	-0.053	0.061
三维跟踪扫描	测量长度	1028.191	1028.127	1028.121	1028.19	1028.104	1028.203	1028.1	1028.093	1028.227
	偏差	0.039	-0.025	-0.031	0.038	-0.048	0.051	-0.052	-0.059	0.075

于小型零件(尺寸 <2m)的高精度表面测量,建议采用粘贴反光标识点方式测量。

参考文献

[1] ESTLER W T, EDMUNDSON K L, PEGGS G N, et al. Large-scale metrology— an update[J]. *Annals of the CIRP*, 2002, 51(2): 587–609.

[2] PEGGS G N, MAROPOULOS P G, HUGHES E B, et al. Recent developments in large-scale dimensional metrology[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(6): 571–595.

[3] 刘胜兰, 罗志光, 谭高山, 等. 飞机复杂装配部件三维数字化综合测量与评估方法[J]. *航空学报*, 2013, 34(2): 409–418.

LIU Shenglan, LUO Zhiguang, TAN Gaoshan, et al. 3D measurement and quality evaluation for complex aircraft assemblies[J].

Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 409–418.

[4] 刘胜兰, 张丽艳. 三维数字化综合测量及其关键技术[J]. *航空制造技术*, 2011, 54(21): 83–86.

LIU Shenglan, ZHANG Liyan. Integrated solution and key technology for 3D coordinate measuring[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011, 54(21): 83–86.

[5] 胡宝海. 基于EMSCON的多激光跟踪仪协同测量关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

HU Baohai. EMSCON-based collaborative measurement technologies of multi-laser tracker[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[6] ZHANG H, ZHANG L Y, WANG H T, et al. Surface measurement based on instantaneous random illumination[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(3): 316–324.

[7] 朱永国, 黄翔, 方伟, 等. 机身调姿方法及误差分析[J]. *南京航空航天大学学报*,

2011, 43(2): 229–234.

ZHU Yongguo, HUANG Xiang, FANG Wei, et al. Fuselage automatic position and pose adjustment method and its error analysis[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(2): 229–234.

[8] Verein Deutscher Ingenieure. VDI/VDE 2634 Part 1, Optical 3D measuring systems: imaging systems with point-by-point probing[S]. Düsseldorf, 2002.

[9] Verein Deutscher Ingenieure. VDI/VDE 2634 part 2, Optical 3D measuring systems: optical systems based on area scanning[S]. Düsseldorf, 2002.

[10] Verein Deutscher Ingenieure. VDI/VDE 2634 part 3, Optical 3D measuring systems: multiple view systems based on area scanning[S]. Düsseldorf, 2008.

通讯作者: 赵建国, E-mail: zjg_5352@163.com。

Research of Three Dimensional Collaborative Measurement of Aircraft Large Complicated Components

ZHAO Jianguo, LIU Xinyu, YU Siyang

(AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China)

[ABSTRACT] Aiming at the difference of measuring technology needed for the assembly of large and complex aircraft structural parts, a collaborative measurement method based on Metronor dual-camera tracking system, hand-held light pen and Aicon scanner was developed. The hand-held light pen and three-dimensional scanner measurement were proposed, the technical scheme omits the work of attaching and removing the reflective mark points, and the testing process in the space of 4m×3m×2m with the measurement error of no more than 0.075mm, which can realize the measurement of internal hidden features, hole position information, axis, mating surface, aerodynamic profile and the gap step, meets the requirements of three-dimensional digital measurement for large complex structures assembly on aircraft.

Keywords: Aircraft assembly; Structural part; Collaborative measurement; Tracking scan; Hand-held light pen

(责编 逸飞)

(上接第54页)

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[ABSTRACT] To improve the accuracy of curved pipes measurement, a point cloud fusing-based measurement method was proposed. The principle of machine vision was utilized to extract coordinate of the marked points from images taken from cameras, and the marked points were used as fixed points in the process of 3D scanning to obtain the uniform point cloud. Point cloud fusion technology was used to obtain the 3D digital model of curved pipes. Experimental results showed that the maximum absolute deviation between measured values and standard value was 0.16mm. This method can effectively improve the accuracy of curved pipes measurement.

Keywords: Pipeline measurement; Global point acquisition; Structured light measurement; Point cloud fusion;

Discrete point model

(责编 逸飞)