



飞机整机装配质量数字化测量技术

隋少春*, 朱绪胜

成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091

* E-mail: suishaochun@163.com

收稿日期: 2020-02-23; 接受日期: 2020-03-23; 网络版发表日期: 2020-05-14

摘要 飞机几何外形即整机装配质量, 直接影响整体装备的气动性能、隐身性能以及结构性能。为更加准确、高效、全面地评价飞机整机装配质量, 本文提出了基于固定式测量站的飞机整机装配质量评价方法。首先介绍了整机固定式测量站的架构, 对其包含的基站、激光扫描系统、自动化设备和系统软件进行了简要的介绍, 并对各系统之间的关系进行了阐述。然后, 对测量设备的测量原理、系统标定方法和坐标系配准方法进行了分析, 通过基于一维靶的虚拟点集控制场外参数标定方法, 提高标定效率, 降低劳动强度, 满足现场标定的需求。同时, 在数据融合方面, 对传统的奇异值分解方法进行了优化, 通过利用随机抽样一致性算法结合奇异值分解方法, 提出了RANSAC-SVD坐标系优化配准算法, 可以剔除由于误差较大而不适合用于坐标系配准的参考点, 仅采用波动较小的内点进行坐标系配准, 可以有效地提高坐标系配准的精度。在此基础上, 简述了该系统的工作原理, 详述了飞机整机测量准备阶段、数据采集阶段和数据处理阶段所包含的主要任务和流程。最后, 对相机的外参数进行了标定并对测量场内的精度进行了分析与测试, 结果表明, 重复测量精度可达到0.024 mm, 3D点坐标测量误差小于0.2 mm, 且有60%的测量数据误差小于0.1 mm。

关键词 飞机几何外形, 飞机整机装配质量, 数字化测量, 固定式测量站, 数据配准

1 引言

当前, 航空制造业朝着高精度、高效率、低成本、柔性化的方向快速发展, 产品零部件越来越大且精度要求越来越高, 尤其是其中的关键特性, 如流体型面的轮廓度、对接同轴度、装配孔位置度、连接面的间隙等^[1]。制造与装配过程中关键特性的微小偏差或波动会严重影响产品性能、降低效率并造成能源的大量消耗^[2]。作为评价飞机整机装配质量的关键特性, 飞机几何外形直接影响整体装备的气动性能、隐身性

能以及结构性能^[3], 因此, 大型飞机整机几何外形的精确三维检测对于航空航天领域高端装备制造具有重要意义。

随着激光跟踪仪、激光雷达、iGPS等高精度数字化测量系统的发展, 飞机制造和装配过程中的测量精度和测量效率有了极大提升。但对于飞机整机装配质量的检测, 由于测量状态复杂、测量精度及效率要求高、数据量巨大等问题, 我国航空制造业仍普遍以部分特征点坐标值来表征飞机整机装配质量的水平测量法^[4-7]。这种评价方式由于采点密度低、特征点坐标

引用格式: 隋少春, 朱绪胜. 飞机整机装配质量数字化测量技术. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1449-1460

Sui S C, Zhu X S. Digital measurement technique for evaluating aircraft final assembly quality (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1449-1460, doi: 10.1360/SST-2020-0049

值测量状态与理论状态不一致等问题,不能精确可靠评价飞机整机装配质量,严重影响和制约了飞机生产质量及其飞行性能。因此,利用高精度数字化测量设备在制造现场快速高效地检测大型飞机整机外形逐渐成为航空制造领域研究的热点问题。

当前对于飞机整机装配质量的测量,主要是利用激光扫描的方式,获取高密度飞机外形点云数据,用于飞机几何外形的评价。Boeing公司和Northrop Grumman公司利用Surphaser激光扫描仪分别对Boeing 747和C2“灰狗”运输机的外形进行扫描,测量精度可以达到 ± 1 mm,测量时间需8 h^[8]。Spirit Aerosystems公司利用激光雷达系统扫描测量蒙皮上的1200个表面点,完成了其三维重建,测量过程需要转站8次,整体测量时间为6 h,测量精度可以达到 ± 0.8 mm^[9]。南京航空航天大学利用激光进行高密度扫描,并优化了数据全局拼接算法,实现歼-5飞机自动化高精度测量^[10]。以上研究大都是基于单台或单种测量设备获取局部测量数据,借助基准点/公共点数据进行多次转站,通过数据融合的方法进行不同站位测量数据的配准,以获取整机测量数据。由于整个测量过程中需要频繁转站,带来以下两个方面的问题:一方面,测量设备多次转站造成操作人员劳动强度大且测量效率低,严重影响飞机生产节拍,同时多次转站引入不可忽略的转站误差,进而削弱了测量数据的准确性,无法准确评估飞机的真实装配状态;另一方面,在执行过程中,需要根据被测对象制定详细的测量工艺方案,需要更加专业的技术人员,因此相应的培训和人员成本较高。此外,以上测量方法无法保证不同架次飞机测量基准的一致性,无法形成最优化的测量工艺规划,造成质量问题无法快速、准确定位。

针对上述问题,飞机整机装配质量高精度、高效率测量对测量系统提出以下要求:一方面,测量量程应具有足够的伸缩性,以适应大尺寸形状特征^[11];另一方面,要求在全量程内保证足够高的测量精度、测点密度和测量效率,以适应法矢与曲率的显著变化^[12]。基于多种测量手段建立组合测量系统,通过优化配置可以扩大测量范围,克服单一设备在测量范围、测量精度、采样密度方面的局限,实现信息互补并使测量结果达到最优是实现整机几何外形高精、高效测量的必然途径^[13]。

本文结合摄影测量仪与光学三维扫描仪的组合测

量系统,提出基于固定式测量站的飞机整机装配质量评价方法,利用光学扫描仪获取高精度局部测量数据,利用摄影测量提供全局测量基准,实现分区域测量数据的转换与拼接,从而更好地满足飞机整机几何外形测量的需求,进而保障飞机的使用性能。

2 整机固定式测量站架构

整机固定式测量站主要包含基站、移动式激光扫描仪、自动化设备、系统软件四部分,如图1所示。以安装在自动化设备上的移动激光扫描仪作为近距离终端测量设备,完成分区域精密点云测量;利用基站建立全局测量坐标系,并完成移动式扫描仪位姿的定位跟踪;通过全局标定完成局部测量数据向全局测量坐标系的统一转换,实现不同位姿下局部测量数据的拼接,各组成部分的具体功能如下。

2.1 基站

基站由一系列分布在整个测量空间内的工业测量相机组成,用于实时定位激光扫描仪的空间姿态。测量相机采用郑州辰维公司研发的MPS/M系列工业摄影测量系统^[14]。相机分辨率为 6600×4400 ,最大采样频率达到5 Hz,视场角(field of view, FOV)达到 $80^\circ \times 50^\circ$ 。为能够测量被动标识点,同时减少测量区域内照明等因素的影响,每个相机配备了色温为5500 K的闪光灯。

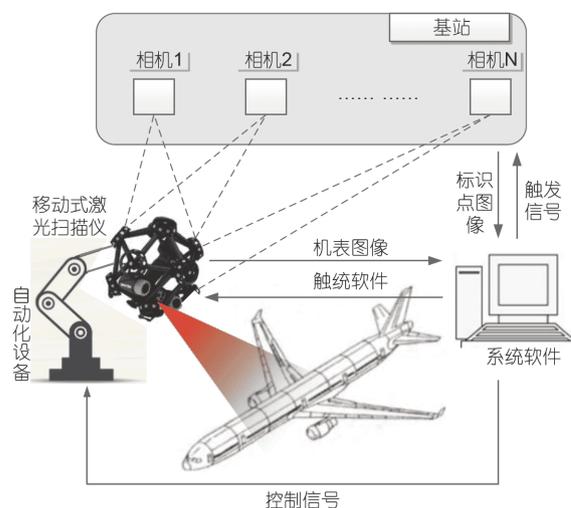


图1 (网络彩图版)固定式测量站架构

Figure 1 (Color online) The architecture of fixed measurement station.

每个相机可实时跟踪测量空间内的多个标识点目标, 相机数量可根据测量对象的尺寸和工作空间进行调整, 各个相机的布设位置需覆盖被测目标的包络空间, 同时需保证分布在测量区域的每一个标识点都至少有两台相机可以拍摄到, 如图2所示, 在30 m×20 m×5 m范围内布置20个相机, 有效工作空间可达到25 m×16 m×4.5 m. 经过可视性分析之后, 相机的空间位置可固定下来, 形成基站. 通过三角测量法, 可对测量空间内扫描仪上的标识点进行跟踪, 实时计算标识点的三维坐标值进而得到激光扫描仪的空间位姿.

2.2 移动式激光扫描仪

移动式激光扫描仪测量原理为激光三角测量法, 其工作原理如图3所示. 激光光源作为测量的指示光源, 将调制后的网状线激光投射在被测表面上, 同时又被CCD相机捕获, 通过几何光学计算方法即可求解到被测表面的点云数据.

同时, 在移动式激光扫描仪上, 按照一定的空间位姿关系, 分布了一系列标识点. 如图4所示, 在测量过程中, 当激光扫描仪上的至少3个标识点被两个相机(C_i 与 C_j 表示测量站中可测量到扫描仪标识点的相机)拍摄到时, 即可确定激光跟踪仪在全局坐标系下的空间姿态. 移动激光扫描仪, 使其扫描范围覆盖整个飞机, 即可利用相机提供的空间位姿信息, 完成测量数据的融合.

2.3 自动化设备

固定式测量站中的自动化设备主要包含升降机构、工业机器人和AGV小车, 如图5所示.

在整机数据采集执行时, 移动式激光扫描仪由自动化设备控制其空间姿态, 其中, 升降机构、工业机

器人负责控制飞机上半部分机背的数据采集的激光扫描仪姿态, 升降机构的下端可安装工业机器人, 通过滑块可沿横梁上的导轨左右移动, 横梁通过两端的滑块可沿前后移动床身上的导轨前后移动, 从而实现工业机器人三个方向的平移运动. 由工业机器人和AGV小车带动的激光扫描仪, 分别负责左右两侧机腹、机翼下表面的数据采集工作. 三台机器人型号均为6自由

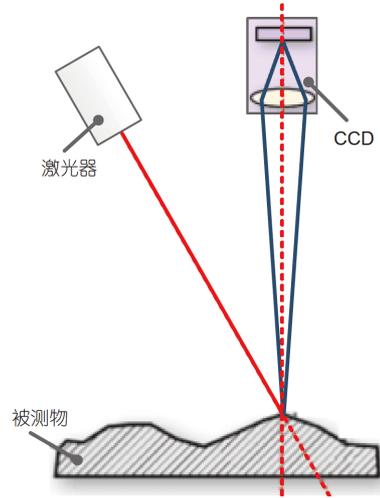


图3 (网络彩图版)激光三角测量法
Figure 3 (Color online) Laser triangulation measurement method.

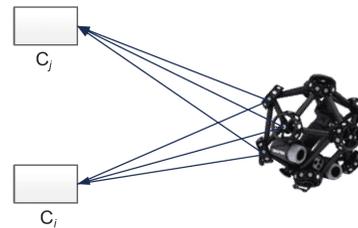


图4 移动式激光扫描仪空间定位
Figure 4 Spatial positioning of the mobile laser scanner.

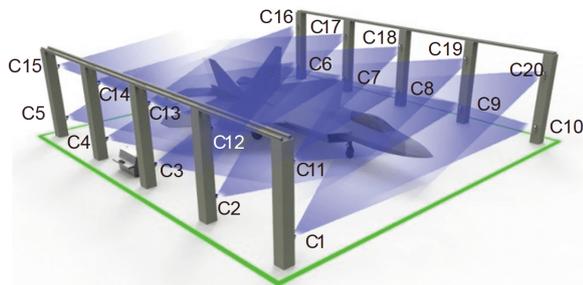


图2 (网络彩图版)相机布设位置仿真
Figure 2 (Color online) Layout simulation of cameras.

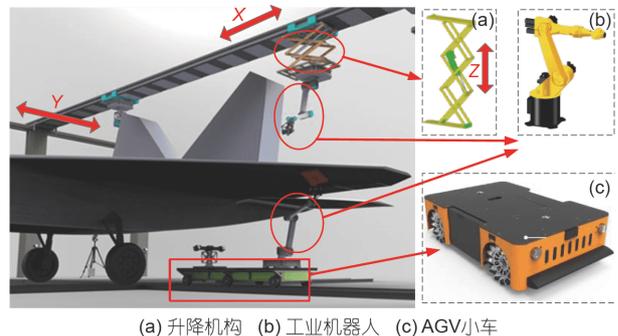


图5 (网络彩图版)自动化设备构成
Figure 5 (Color online) Components of automation equipment.

度的ABB 5500机器人, 机器人的运动控制系统为ABB 配套的IRC5P控制器。

2.4 系统软件

系统软件用于发送自动化设备控制指令, 使其按照规定路径进行运动, 同时每到达一个测量站位时, 发送测量触发信号, 控制基站和三维扫描仪进行数据采集, 并将采集得到的数据进行融合和处理, 用以评价飞机整机装配质量, 软件由控制模块、数据采集模块和数据处理模块组成, 各部分功能如下。

(1) 控制模块. 测量过程中, 将飞机整机划分为若干个区域, 每个区域由不同的扫描仪进行数据的采集. 控制模块发送指令给AGV和升降机构, 使其移动到规划好的测量站位, 然后发送控制指令给工业机器人, 变换机器人末端姿态从而控制三维扫描仪的运动, 完成该区域的图像采集。

(2) 数据采集模块. 在不同站位时, 系统软件发送数据采集指令, 完成对机表图像的采集, 同时软件发送同步触发命令至基站, 使基站内的相机同时触发, 完成扫描仪上标识点的图像采集, 从而实现扫描仪在测量空间内的位姿计算。

(3) 数据处理模块. 三维扫描仪和基站采集的图像, 首先通过软件进行三维重建, 得到点的三维坐标值. 然后, 根据三维扫描仪上标识点的三维坐标值进行坐标系配准, 使不同测量位姿三维扫描仪得到的点云数据融合到全局坐标系下, 完成数据的融合处理. 最终, 通过测量值与飞机机表理论值的对比, 完成飞机几何外形的评价, 并输出飞机整机装配质量评价报告。

3 数学模型

3.1 双目视觉测量数学模型

固定式测量站中, 基站对空间内的标识点测量和扫描仪进行点云扫描时, 基本原理都是双目视觉测量方法^[15,16]. 如图6所示, 对于空间内的一点P, 其在左右两像平面上 $o_1-x_1y_1$ 和 $o_2-x_2y_2$ 的坐标分别为 $p_l=[u_l, v_l]$ 和 $p_r=[u_r, v_r]$. 像点 p_l 在左相机坐标系 $O_l-X_lY_lZ_l$ 中的坐标值为 (x_l, y_l, f_l) , 像点 p_r 在右相机坐标系 $O_r-X_rY_rZ_r$ 中的坐标值为 (x_r, y_r, f_r) .

由点 O_l 、 p_l 、P及 O_r 、 p_r 、P三点共线可得

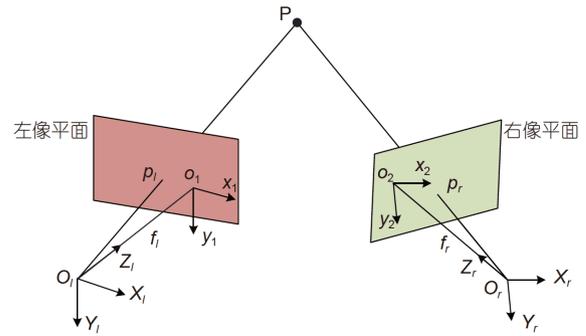


图6 (网络彩图版)双目视觉测量空间点三维重建示意图
Figure 6 (Color online) 3-D reconstruction sketch map of spatial point measured by binocular vision.

$$\begin{cases} \frac{x_l}{X_l} = \frac{y_l}{Y_l} = \frac{f_l}{Z_l}, \\ \frac{x_r}{X_r} = \frac{y_r}{Y_r} = \frac{f_r}{Z_r}. \end{cases} \quad (1)$$

$O_l-X_lY_lZ_l$ 坐标系与 $O_r-X_rY_rZ_r$ 坐标系间的相对位置关系可以通过旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} 表示, 则有

$$\begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_r - T_x \\ Y_r - T_y \\ Z_r - T_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T. \quad (4)$$

联立公式(1)和(2)即可求得待测空间点P的三维坐标。

3.2 系统标定算法

基站所包含的相机阵列, 需对其内外参数进行标定, 才能根据双目视觉测量数学模型计算空间点的坐标值. 在本系统中, 相机的内参数在出厂之前就通过标定场进行标定, 而每个相机的外参数由于安装位置或布置形式不同, 需在现场进行标定. 为提高标定效率, 降低劳动强度, 更适用于生产现场, 本文采用基于一维靶的虚拟点集控制场外参数的标定方法^[17,18].

如图7所示, 不同视点获取的同一场景的图像之间存在对极几何关系, 任一空间点 $M=(X, Y, Z, 1)$, 其在左

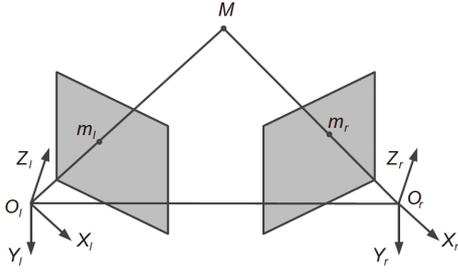


图7 (网络版彩图)对极几何示意图

Figure 7 (Color online) Diagrammatic diagram of polar geometry.

像平面的像 $m_l=(x_l, y_l, 1)$, 在右像平面的像为 $m_r=(x_r, y_r, 1)$. O_l - X_l - Y_l - Z_l 与 O_r - X_r - Y_r - Z_r 的欧式变换可以表示为

$$(x_l \ y_l \ z_l) = [\mathbf{R} \ \mathbf{T}](x_r \ y_r \ z_r)^T. \quad (5)$$

由透视投影关系, M 与 m_l 和 m_r 关系为

$$\begin{cases} \lambda_l m_l = [I \ 0]M = P_l M, \\ \lambda_r m_r = [\mathbf{R} \ \mathbf{T}]M = P_r M, \end{cases} \quad (6)$$

式中, P_l 和 P_r 分别为左右像片的投影矩阵.

此外, O_l , O_r , M , m_l , m_r 的几何关系还满足共面约束, 即

$$l_{O_r} \cdot (l_{O_l} \times l_{O_r}) = 0 \Leftrightarrow m_r^T \mathbf{E} m_l = 0. \quad (7)$$

上式可表示为

$$u^T e = 0, \quad (8)$$

其中,

$$\begin{cases} u = [x_l x_r, y_l x_r, x_r, x_l y_r, y_l y_r, y_r, x_l, y_l, 1], \\ e = [E_{11}, E_{12}, E_{13}, E_{21}, E_{22}, E_{23}, E_{31}, E_{32}, E_{33}]. \end{cases} \quad (9)$$

根据八点算法原理^[19,20], 即可求解 \mathbf{E} . 此外, 通过旋转矩阵 \mathbf{R} , 可以得到

$$\begin{cases} E_{11}E_{21} + E_{12}E_{22} + E_{13}E_{23} = -T_x T_y, \\ E_{11}E_{31} + E_{12}E_{32} + E_{13}E_{33} = -T_x T_z, \\ E_{21}E_{31} + E_{22}E_{32} + E_{23}E_{33} = -T_y T_z. \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \\ T_x^2 & T_x T_y & T_x T_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{21} & E_{22} \\ E_{31} & E_{32} \\ E_{22}E_{33} - E_{32}E_{23} & E_{31}E_{23} - E_{31}E_{33} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

解算上式并结合绝对定向方法^[20]即可求解得到 T 和 R .

3.3 基于随机抽样一致性和奇异值分解的扫描仪定位算法

扫描仪由自动化系统控制采集不同区域的飞机表面点云数据, 由于采集的数据都是基于扫描仪自身的坐标系, 因此需要使用基站进行扫描仪位姿定位, 将扫描仪获取的数据统一到全局坐标系下. 扫描仪的空间姿态, 可以用旋转矩阵 \mathbf{R}_M 和平移向量 \mathbf{T}_M 表示, 即 $[\mathbf{R}_M \ \mathbf{T}_M]$, 共涉及6个自由度参数 $[\alpha_M, \beta_M, \gamma_M, t_{xM}, t_{yM}, t_{zM}]$.

\mathbf{R}_M 和 \mathbf{T}_M 分别为

$$\mathbf{R}_M = \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中, c 代表 \cos (余弦值), s 代表 \sin (正弦值).

$$\mathbf{T}_M = (t_{xM}, t_{yM}, t_{zM})^T. \quad (13)$$

通过不在同一直线上三个标识点的坐标值, 即可求解 $[\mathbf{R}_M \ \mathbf{T}_M]$. 为提高配准精度同时简化计算复杂度, 本文采用基于奇异值分解的优化配准算法^[21]. 假设某一时刻, 扫描仪上有一组标识点 \mathbf{P}_M 被基站拍摄到, 并得到其在参考坐标系下的坐标值为 \mathbf{P}_R . 参考点两组值具有相同的重心, 这样可以先将平移矩阵 \mathbf{T}_M 分离, 求解旋转矩阵 \mathbf{R} . 两组坐标值的重心坐标 \mathbf{P}_{RC} 和 \mathbf{P}_{MC} 为

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{RC} = \frac{\sum \mathbf{P}_R}{n}, \\ \mathbf{P}_{MC} = \frac{\sum \mathbf{P}_M}{n}, \end{cases} \quad (n \geq 3). \quad (14)$$

重心化后的坐标分别为

$$\begin{cases} \overline{\mathbf{P}}_R = \mathbf{P}_R - \mathbf{P}_{RC}, \\ \overline{\mathbf{P}}_M = \mathbf{P}_M - \mathbf{P}_{MC}. \end{cases} \quad (15)$$

重心化后, 两组坐标值存在以下关系:

$$\overline{\mathbf{P}}_R = \mathbf{R}_M \overline{\mathbf{P}}_M. \quad (16)$$

考虑配准误差, 上式可进一步表达为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z) = \overline{\mathbf{P}}_R - \mathbf{R}_M \overline{\mathbf{P}}_M. \quad (17)$$

目标函数可以表示为

$$\min \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{ix}^2 + \varepsilon_{iy}^2 + \varepsilon_{iz}^2) = \min \sum \| \overline{\mathbf{P}}_R - \mathbf{R}_M \overline{\mathbf{P}}_M \|^2$$

$$\Leftrightarrow \max(\text{trace}(\mathbf{R}_M \mathbf{H})), \quad (18)$$

其中,

$$\mathbf{H} = \sum \overline{\mathbf{P}}_M \overline{\mathbf{P}}_R^T. \quad (19)$$

对 \mathbf{H} 进行奇异值分解,

$$\mathbf{H} = \mathbf{Q}^T \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}. \quad (20)$$

则 \mathbf{R}_M 最优值为

$$\mathbf{R}_M = \mathbf{V}^T \mathbf{Q}. \quad (21)$$

对应的平移向量为

$$\mathbf{T}_M = \mathbf{P}_R - \mathbf{R}_M \mathbf{P}_M. \quad (22)$$

在复杂工况下的实际测量过程中, 扫描仪上的参考点由于环境因素、测量误差等影响, 会造成某些参考点的理论值发生波动, 将带来非常大的配准误差. 结合随机抽样一致性算法^[22]的思想与奇异值分解方法, 为减小配准误差, 在进行坐标系配准时, 应当选择坐标值波动较小的参考点进行计算, 如图8所示.

依据随机抽样一致性方法, 全体被测到的参考点根据其波动量被分为内点和外点, 其中内点将用来进行计算, 而外点将被剔除掉. 本文提出了一种综合奇异值分解和随机抽样一致性的坐标系优化配准方法, 其流程如图9所示, 坐标系优化配准可按照以下流程展开, 具体步骤如下.

步骤1 从所有全局点中随机抽取三个点, 如果三点在同一直线上则重新抽样, 如果三点不在同一直线上, 利用奇异值分解方法, 求解配准关系. 当采样次数为*i*时, 求解得到的旋转矩阵和平移矩阵记为 \mathbf{R}_i 和 \mathbf{T}_i .

步骤2 利用求解得到的 \mathbf{R}_i 和 \mathbf{T}_i 将所有全局点在变

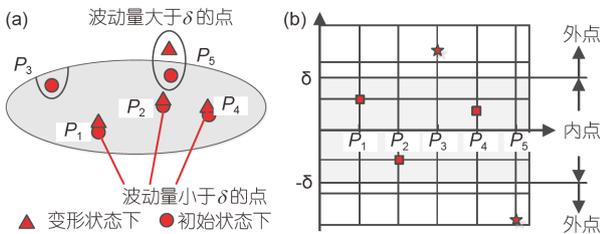


图8 (网络彩图版)基于RANSAC方法挑选参考点. (a) 参考点的波动; (b) RANSAC的剔除外点

Figure 8 (Color online) Reference points selection based on RANSAC. (a) Reference points variation; (b) excluding outlier points with RANSAC.

形状态测量坐标系下的坐标值转换到初始状态的测量坐标系下. 此时, 配准的残差矩阵为

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i & \mathbf{T}_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{P}_M - \mathbf{P}_R. \quad (23)$$

根据全局点波动量限制的阈值 $[\delta]$ 判断内点. 如果配准之后某点残差的2-范数满足 $\|\varepsilon\|_2 < [\delta]$, 则此点为内点; 如果 $\|\varepsilon\|_2 \geq [\delta]$, 则此点为外点. 在判断完成之后, 记录下所有内点以及内点的个数, 记为 N_i .

步骤3 重复步骤1及步骤2直到达到遍历所有全局点的组合, 并找到含有内点最多的组合, 即

$$N = \max\{N_i\}. \quad (24)$$

最后利用这一个组合内所有的内点, 根据奇异值分解方法, 计算最佳的旋转矩阵和平移矩阵, 并分别记作 \mathbf{R}_M 和 \mathbf{T}_M .

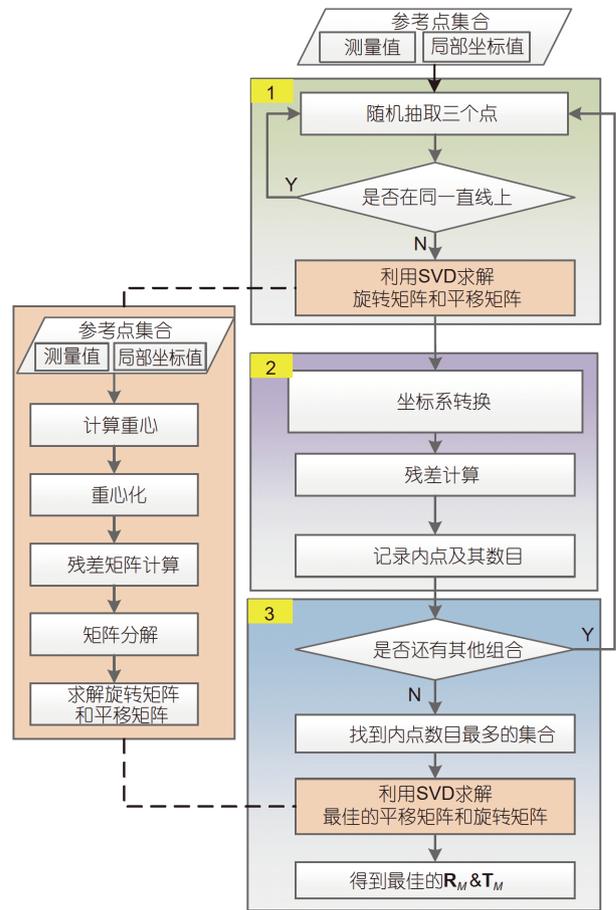


图9 (网络彩图)基于SVD和RANSAC的坐标系优化配准
Figure 9 (Color online) Coordinate systems optimization registration based on SVD and RANSAC.

定位扫描仪之后, 就可以按照下式进行坐标系转换, 将扫描得到的数据转换到全局坐标系下, 并进行偏差值计算.

$$P_R = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_M & \mathbf{T}_M \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} P_M. \quad (25)$$

4 系统工作流程

基于整机测量站为飞机整机装配质量测量与评价提供了一站式的解决方案, 其工作流程和步骤可按照图10开展, 主要包括准备阶段、数据获取阶段和数据处理阶段三个阶段.

(1) 准备阶段. 这个阶段主要包括整机测量前期的准备工作. 在测量之前, 首先要进行系统的标定, 确定基站内所有相机的外部参数, 系统标定时需对标定结果进行评价, 使其满足整机测量的精度要求. 然后将飞机移动至测量位置并按三点支撑或托架支撑的方式进行定位支撑^[21].

同时, 根据飞机数模进行测量规划, 分配每个扫描仪的测量区域并生成对应的测量路径控制指令. 上述工作就绪之后, 系统进行初始化, 进行通讯接口的自

检, 并将自动化测量设备移动至初始位置.

(2) 数据获取阶段. 准备工作就绪后, 按照规划的测量路径, 将各自动化设备运动至其设定的站位点, 然后对该站位点覆盖的区域进行扫描测量. 同时, 系统软件同步发送相机触发指令, 基站对扫描仪的姿态进行实时测量和跟踪. 当所有区域完成数据扫描之后, 自动化设备恢复至初始位姿, 数据采集完毕.

(3) 数据处理阶段. 基站采集的参考点图像和扫描仪采集的机表点云图像, 首先经过三维重建, 分别生成参考点和机表点的三维坐标, 然后利用基于随机抽样一致性和奇异值分解的坐标系配准方法, 将不同测量站位下的点云数据统一至全局坐标系下, 并进行整机装配质量的评价.

5 案例验证

本文以搭建的整机测量站为例, 验证算法和模型的有效性, 测量站的基站由20个相机阵列组成, 并通过可视性分析(如图2所示), 相机采用郑州辰维科技股份有限公司M30相机. 移动式扫描仪采用CreaForm公司的MetraSCAN 750Elite激光扫描仪, 其主要参数如下: 体积精度(9.1 m^3)为 0.064 mm , 积精度(16.6 m^3)为

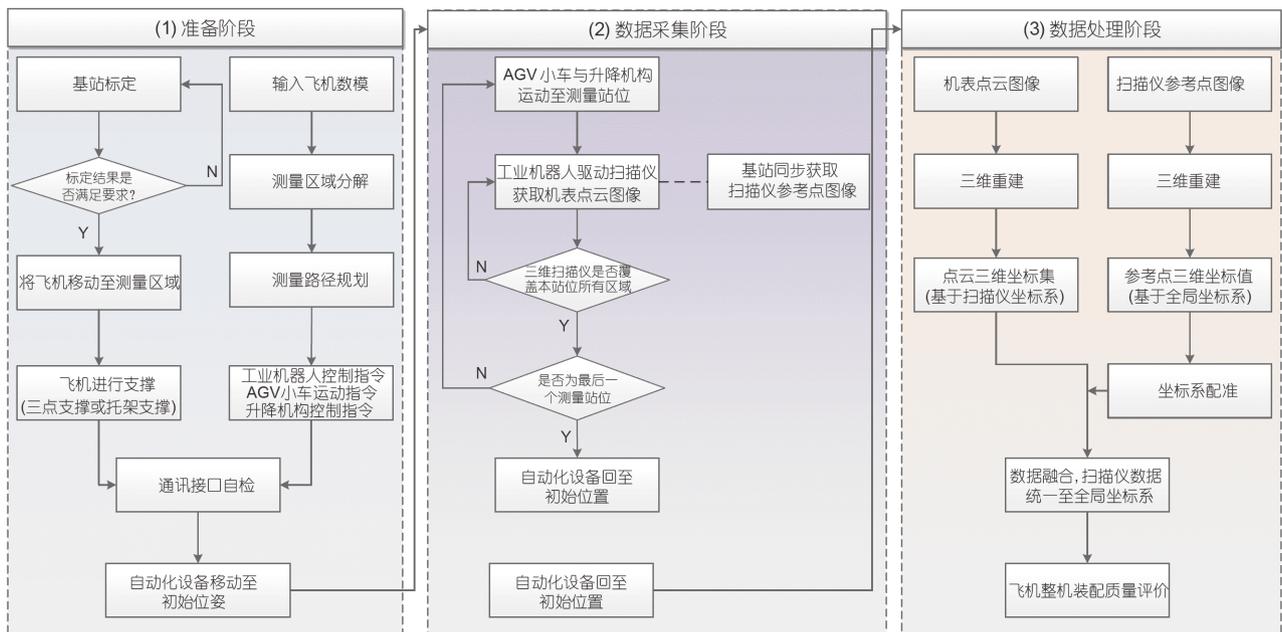


图10 (网络版彩图)固定式测量站工作流程示意图

Figure 10 (Color online) Workflow diagram of fixed measurement station.

0.078 mm, 分辨率为0.05 mm, 扫描区域为275 mm × 250 mm.

5.1 相机内参标定

相机内参数利用10参数模型进行标识, 采用三维立体摄影测量标定场进行标定, 如图11所示. 其坐标系以标定场左下角的点为坐标原点, X轴、Y轴平行于墙面, Z轴垂直于墙面向外. 标定场的尺寸为3.3 m × 2.0 m × 0.6 m. 标定场内均匀布设了φ6 mm的单点和编码点. 标定场中布设两根基准尺, 作为检核的基准.

用待标定相机对控制场拍摄图像, 摄影距离约为3.5 m. 分别在9个位置处对标定场进行测量, 拍摄位置的上下分布为: 3个位置尽可能靠近房顶, 3个位置尽可能贴近地面, 3个位置在中间; 左右分布为: 3个位置尽可能靠近左边, 3个位置尽可能靠近右边, 3个位置在中间. 每一个位置处分别滚动相机0°, 90°, 180°, 270°进行拍照, 且这四个角度状态应分别位于拍摄位置的上、下、左、右约距中心位置20 cm距离, 共拍摄不少于36张图像. 拍摄时应尽量保证每张照片测量点均能布满整个图像, 如图12所示. 根据照片, 进行数据处理, 得到待测相机的10个内参数, 见表1.

5.2 相机外参标定

基于3.2节数学模型, 为了便于生产现场的快速标定, 采用基于一维靶(基准尺)的虚拟点集标定法进行多相机摄影测量系统的外部参数标定, 如图13所示.

该方法采用已知长度的基准尺在多相机的公共视场空间自由移动, 获取多幅标定图像, 通过图像处理得到多组像点坐标, 通过视图间的几何关系实现相对定



图 11 (网络彩图版) 标定场
Figure 11 (Color online) Calibration field.

向和通过已知长度实现绝对定向, 考虑欧氏空间不变性和像点残差最小, 列优化函数, 通过迭代获取相机结构参数的精确值.

5.3 系统精度验证

由于测量传感器的误差远小于被测尺度的 10^{-4} , 计算模型中非线性因素对测量误差影响非常小, 因此

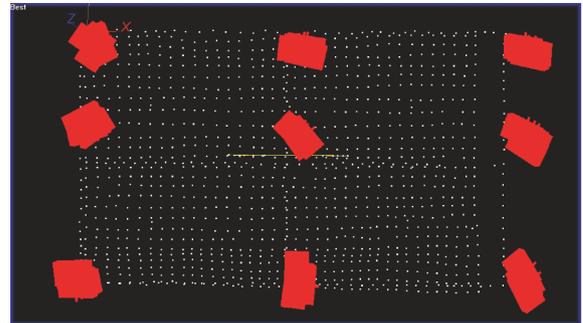


图 12 (网络彩图版) 摄站位置分布图
Figure 12 (Color online) Measurement stations layout.

表 1 相机内参数标定结果

Table 1 Camera internal parameters calibration results

分类	内参数	结果
径向畸变	K_1	0.00026154865
	K_2	-0.00000068204
	K_3	0.00000000204
偏心畸变	P_1	-0.00000181760
	P_2	-0.00000203426
像平面畸变	b_1	0.00003565759
	b_2	0.00005543206
主点偏差	x_0 (mm)	0.06246972000
	y_0 (mm)	-0.19333879000
焦距	f_0 (mm)	21.67280279000

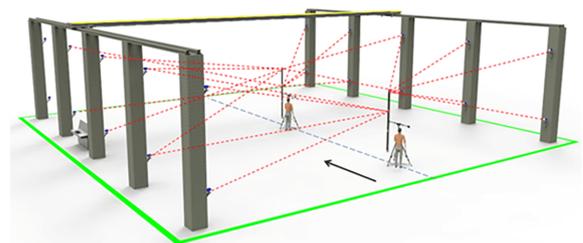


图 13 (网络彩图版) 整机测量站的标定
Figure 13 (Color online) Calibration of fixed measurement station.

为了评估本系统的测量能力, 采用多变量误差传递定理^[23,24]. 影响最终测量精度的误差源主要包括以下几点.

(1) 3D点的坐标测量误差. 根据系统工作原理, 造成3D点坐标测量误差的因素主要为相机的技术参数(焦距、分辨率、视场角、镜头畸变)、系统布局(相机和标识点之间的距离、相机与标识点之间的姿态、标识点尺寸等)、计算方法(图像处理算法)、环境因素(相机振动、光污染等)和系统标定误差. 其中影响最大的是标识点在图像上的尺寸大小, 它是相机分辨率、焦距、镜头畸变、标识点与相机之间的位姿、相机标定参数等参数综合作用的结果. 标识点在图像上的最佳大小为5~15个像素^[25].

3D点的坐标测量误差可以用测量重复性精度和距离测量精度进行评定. 本系统对12个空间位姿不变的测量点重复采样200次, 通过统计分析, 对系统的重复性精度进行了验证, 如表2所示. 对于空间中单个空间点的测量, 重复测量精度可达到0.024 mm. 为验证基站系统测量精度, 对摄影测量一维基准尺的距离长度进行了380次测量. 基站测量结果与标定好的长度进行了对比, 如图14所示. 结果表明, 与标准长度相比, 测量误差均小于0.2 mm, 且有60%的测量数据误差均小于0.1 mm. 此外, 通过测量结果可以发现, 不同次测量的误差差异较大, 造成这一现象的原因在于测量空间不同位置测量时, 距离相机的距离以及与相机之间

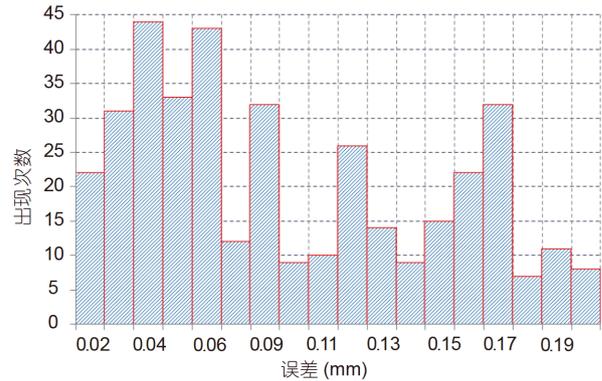


图14 (网络版彩图)测量结果对比
Figure 14 (Color online) Measurement results comparison.

的角度差异较大. 同时, 不同的测量规划路径亦会对测量结果造成影响^[26].

(2) 相机系统同步误差. 由于各个相机之间采用以太网连接, 通过同步信号触发, 触发延迟可控制到毫秒级, 所以影响可以忽略.

(3) 坐标系配准误差. 坐标系配准过程中, 采用的配准算法、扫描仪上标识点的波动和测量误差, 都会造成配准误差, 其中影响最大的是扫描仪上标识点的波动和测量误差. 本文采用基于RANSAC-SVD坐标系的配准方法, 能通过设置阈值, 筛选满足要求的配准点. 本文采用了12个测量点的两组坐标值, 对配准方法进行了验证, 表3表明, 单次配准的最大误差约为

表2 系统重复性测量精度评定

Table 2 System repeatability accuracy evaluation

	X_R (mm)	Y_R (mm)	Z_R (mm)	X_M (mm)	Y_M (mm)	Z_M (mm)	ϵ_x (mm)	ϵ_y (mm)	ϵ_z (mm)	ϵ (mm)
1#	1280.832	455.252	1573.187	1765.593	170.630	1151.134	0.014	0	0.005	0.015
2#	1267.975	454.594	1455.099	1626.682	259.200	1349.919	0.021	0.002	-0.003	0.021
3#	1255.141	453.934	1336.984	1451.826	295.157	1536.990	0.019	0.004	0.006	0.020
4#	1216.573	451.971	982.683	1801.156	134.376	1165.008	0.021	0	0.008	0.022
5#	1203.735	451.333	864.583	1800.584	81.873	1417.803	0	-0.019	0.007	0.020
6#	1148.099	470.527	1587.554	1752.116	-10.988	1654.188	0.014	0.014	0.008	0.021
7#	1135.241	469.868	1469.446	1829.761	100.401	1136.691	0.015	0.006	0.008	0.018
8#	1122.571	469.288	1351.362	1940.398	-84.168	1279.333	-0.015	-0.06	-0.001	0.062
9#	1109.595	468.591	1233.265	1933.567	-297.689	1415.092	-0.008	-0.018	-0.001	0.020
10#	1096.664	467.875	1115.198	1832.460	91.223	1084.908	0.007	0.004	-0.012	0.014
11#	1083.849	467.254	997.067	1953.598	-129.062	1026.155	-0.004	0.004	-0.01	0.011
12#	1070.972	466.586	878.946	2016.370	-375.212	977.944	0.013	0.015	0.009	0.022

表 3 坐标系配准方法验证

Table 3 Coordinate registration method verification

	\bar{x} (mm)	\bar{y} (mm)	\bar{z} (mm)	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)	σ (mm)
1#	1296.261	445.343	1572.541	0.018	0.011	0.011	0.024
2#	1282.560	446.105	1454.5404	0.008	0.01	0.013	0.018
3#	1268.852	446.867	1336.532	0.014	0.005	0.008	0.017
4#	1227.733	449.155	982.522	0.008	0.001	0.012	0.014
5#	1247.021	449.917	864.518	0.009	0.005	0.002	0.010
6#	1163.591	460.199	1588.052	0.017	0.012	0.002	0.021
7#	1149.889	460.961	1470.041	0.006	0.001	0.002	0.006
8#	1136.188	461.723	1352.042	0.019	0.004	0.008	0.021
9#	1122.476	462.486	1234.042	0.003	0.021	0.003	0.021
10#	1108.761	463.248	1116.032	0.011	0.015	0.009	0.021
11#	1095.062	464.011	998.028	0.015	0.006	0.017	0.023
12#	1081.350	464.773	880.024	0.021	0.003	0.008	0.023

0.022 mm.

(4) 激光扫描仪误差. 激光扫描仪也存在2D点坐标测量误差、系统标定误差、3D点测量误差等影响因素, 这些因素造成的综合误差可用激光扫描仪制造商提供的误差进行表示. 本系统采用的激光扫描仪, 单次测量最高精度可达到0.03 mm. 同时, 在扫描过程中, 为提高测量精度, 应尽量使扫描仪沿表面法向矢量方向扫描.

6 结论与讨论

飞机几何外形即整机装配质量, 直接影响整体装备的气动性能、隐身性能以及结构性能. 为了更准确、高效、全面评价飞机整机装配质量, 本文对基于整机测量站的飞机整机装配质量评价方法进行了研究.

一方面, 搭建了基于计算机视觉的整机测量站. 该测量站由基站、移动式激光扫描仪、自动化系统和系统软件四部分构成. 安装在自动化设备上的移动激光扫描仪作为近距离终端测量设备, 完成分区域精密点云测量; 利用基站建立全局测量坐标系, 并完成扫描仪位姿的定位跟踪; 通过全局标定完成局部测量数据向全局测量坐标系的统一转换, 实现不同位姿下局部测量数据的拼接, 从而完成整机几何外形点云数据的自动化采集、数据融合和几何外形偏差的计算分析.

此外, 通过补充基站内相机个数和空间布局、增加扫描仪和自动化系统的数量, 该测量站可适应不同尺寸、不同精度要求的大型部件的高精度、高效测量, 除飞机产品外, 还可应用于航天、船舶、能源、车辆等大尺寸制造领域.

另一方面, 本文对测量站中的相关算法进行了阐述和优化. 介绍了测量站中两种测量设备: 多相机系统和激光扫描系统的测量原理, 同时对基站内多相机系统的标定算法进行了分析, 通过基于一维靶的虚拟点集外参数标定方法, 提高标定效率, 降低劳动强度, 满足现场标定的需求. 此外, 在数据融合方面, 对传统的奇异值分解方法进行了优化, 通过利用随机抽样一致性算法结合奇异值分解方法, 提出了RANSAC-SVD坐标系优化配准算法. 利用此算法进行坐标系配准时, 可以剔除由于误差较大而不适合用于坐标系配准的参考点, 而只是利用波动较小的内点进行坐标系配准, 这样可以有效地提高坐标系配准的精度.

最后, 对整机固定式测量系统的测量精度进行了验证和分析, 结果表明, 方法和平台满足飞机整机测量的需求. 该系统可实现整机装配测量的数字化、自动化、信息化及智能化, 一站式自动完成整机装配质量的检测任务.

需要指出的是, 同一套固定式测量站, 如果采用不同的测量规划方案, 测量结果的一致性较差. 因此, 未来需要通过对整机测量规划方案的研究, 获取综合精

度和效率最优的测量规划方案, 在满足测量精度的前提下, 提高测量效率. 同时, 测量过程中, 由于温度、湿度、振动等环境因素的影响, 一方面不仅会影响测量设备、测量工装等的精度, 另外一方面, 由于环境条件随时间变化, 整机测量时容易造成不同站位的测

量数据环境条件差别较大. 且由于飞机数学模型定义均为标准值(20°C, 1个标准大气压), 测量值与理论值对比的边界条件也不相同. 因此, 下一步工作, 需对测量站进行环境条件控制, 以保证测量结果评价的准确性.

参考文献

- Zheng L Y, McMahon C A, Li L, et al. Key characteristics management in product lifecycle management: A survey of methodologies and practices. *P I Mech Eng B J Eng*, 2008, 222: 989–1008
- Thornton A C. *Variation Risk Management: Focusing Quality Improvements in Product Development and Production*. New Jersey: John Wiley and Sons, 2004. 512–513
- Fan Y Q. *Modern Aircraft Manufacturing Technology* (in Chinese). Beijing: Beihang University Press, 2001 [范玉青. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001]
- Li L J, Lin X Z, Zhou N, et al. Research on aircraft level measurement technology based laser radar and iGPS (in Chinese). *Aeronaut Manuf Technol*, 2012, 22: 50–53 [李丽娟, 林雪竹, 周娜, 等. 基于激光雷达、iGPS的飞机水平测量技术研究. 航空制造技术, 2012, 22: 50–53]
- He B G, An Z Y. Research on horizontal measurement technology based on laser radar (in Chinese). *Laser Infrared*, 2014, 8: 866–869 [何秉高, 安志勇. 基于激光雷达的水平测量技术研究. 激光与红外, 2014, 8: 866–869]
- Yu S C, Kang X F, Zhai N, et al. Study of aircraft level-testing measurement technology based on laser tracker and iGPS (in Chinese). *Aeronaut Manuf Technol*, 2015, 21: 119–121 [喻世臣, 康晓峰, 翟南, 等. 基于激光跟踪仪、iGPS的飞机水平测量技术研究. 航空制造技术, 2015, 21: 119–121]
- Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. GJB3505: Inspection and acceptance specification for military aircraft (in Chinese). 1998. 3–4 [中华人民共和国总装备部. GJB 3505-1998: 军用飞机检验验收规范. 1998. 3–4]
- Surphaser. 3D Scanner Surphaser® 100HSX. 2011. <http://www.surphaser.com/100hsx-scanner.html>
- Nikon. Practical case of lidar (in Chinese). 2010. <http://www.docin.com/touch/detail.do?id=236275229> [Nikon. 激光雷达实际案例. 2010. <http://www.docin.com/touch/detail.do?id=236275229>]
- Yi C, Lu D, Xie Q, et al. Hierarchical tunnel modeling from 3D raw LiDAR point cloud. *Comput-Aided Des*, 2019, 114: 143–154
- Galetto M, Mastrogiacomo L, Pralio B. MScMS-II: An innovative IR-based indoor coordinate measuring system for large-scale metrology applications. *Int J Adv Manuf Technol*, 2011, 52: 291–302
- Shien R, Takashi M, Masumi, S, et al. Fast and accurate shape measurement system utilizing the fringe projection method with a ferroelectric liquid-crystal-on-silicon microdisplay. *Opt Eng*, 2012, 51: 1–8
- Qu X J, Meng B, Liu C. On-site global calibration and optimization bining measurement for large free-form surfaces part (in Chinese). *Computer integrated manufacturing system*, 2015, 9: 2384–2392 [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. 计算机集成制造系统, 2015, 9: 2384–2392]
- Sunward Technology Co., Ltd. MPs/M series multi-camera real time photogrammetry system (in Chinese). <http://www.chenway.cn/product/prod1/6.html>, 2018 [郑州辰维科技股份有限公司. MPS/M系列多相机实时摄影测量系统. <http://www.chenway.cn/product/prod1/6.html>, 2018]
- Legarda A, Izaguirre A, Arana N, et al. Comparison and error analysis of the standard pin-hole and Scheimpflug camera calibration models. In: *Informal Proceedings of the 11th International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and Their Application to Mechatronics*. Toulouse: France, 2013
- Liu T, Burner A W, Jones T W, et al. Photogrammetric techniques for aerospace applications. *Prog Aerospace Sci*, 2012, 54: 1–58
- Yang S, Qi F Y, Zhen Y, et al. Displacement and deformation measurement for large structures by camera network. *Opt Laser Eng*, 2014, 54: 247–254
- Svoboda T, Martinec D, Pajdla T. A convenient multicamera self-calibration for virtual environments. *Presence-Teleoperators Virtual Environ*, 2005, 14: 407–422

- 19 Zhang Z Y . Camera calibration with one-dimensional objects. *IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell*, 2004, 26: 892–899
- 20 Huang G P. Theory, Method and Application of Digital Close Range Industrial Photogrammetry (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016. 169–170 [黄桂平. 数字近景工业摄影测量理论、方法与应用. 北京: 科学出版社, 2016. 169–170]
- 21 Zhang F M, Qu X H, Ye S H. Multiple sensor fusion in large scale measurement (in Chinese), *Opt Precision Eng*, 2008, 16: 1236–1240 [张福民, 曲兴华, 叶声华. 大尺寸测量中多传感器的融合. 光学精密工程, 2008, 16: 1236–1240]
- 22 Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1987. 35–38
- 23 Longuet-Higgins H C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 1981 293: 133–135
- 24 Luhmann T. Precision potential of photogrammetric 6DOF pose estimation with a single camera. *ISPRS J Photogrammetry Remote Sens*, 2009, 64: 275–284
- 25 International Organization for Standardization, ISO/IEC Guide 98-e: 2008: Uncertainty of measurement Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008
- 26 Galetto M, Mastrogiacomo L, Pralio B. The Mobile Spatial coordinate Measuring System II (MScMs-II): System description and preliminary assessment of the measurement uncertainty. *Int J Metrol Qual Eng*, 2010, 1: 111–119

Digital measurement technique for evaluating aircraft final assembly quality

SUI ShaoChun & ZHU XuSheng

Chengdu Aircraft Manufacturing Industry (Group) Co., Ltd. Chengdu 610091, China

The geometrical shape of an aircraft (final assembly quality) directly affects the aerodynamic performance, stealth performance, and structural performance of the overall aircraft. This study aims to improve the efficiency and accuracy of the aircraft final assembly quality evaluation. The proposed aircraft final assembly quality evaluation method is based on a fixed digital measurement station. The design of the measurement station that includes constellation, laser scanner, automation equipment, and system software, is reported. Additionally, the relationship between these components and the measurement station is described. Mathematical models of the measurement station (measuring method, system calibration method, and coordinate system registration method) are analyzed. Standard algorithms and the RANSAC-SVD algorithm are used to improve data registration accuracy. The RANSAC-SVD algorithm filters out the set of reference points that are more suited for data recording. The accuracy of model is optimized accordingly. Consequently, the working principle of the system is briefly described, and the main tasks and processes included in the aircraft measurement preparation phase, data acquisition phase, and data analysis processing phase are detailed. Finally, the internal and external parameters of the camera were calibrated and the accuracy of the measurement field was analyzed. The results show that a repeatability of 0.024 mm can be reached, the measurement errors are less than 0.2 mm, and 60% of the measurement data values are less than 0.1 mm.

geometrical shape of aircraft, final assembly quality, digital measurement, fixed measurement station, data matching

doi: [10.1360/SST-2020-0049](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0049)