

大尺寸复杂形状组合测量系统的全局标定与多视数据融合

孟 彪¹ 曲学军²

摘 要 为解决大尺寸复杂形状全局测量与局部精度控制的矛盾, 提出以大空间测量设备为全局控制手段, 集成终端近距离测量设备的组合测量、全局标定与数据融合方法. 在多站位下观测测量控制网以获取冗余观测数据, 利用测量平差优化技术完成控制网的高精度标定. 建立全局测量坐标系与测量控制网的物理关联, 实现测量空间基准定义的唯一性. 布设扫描仪观测目标并建立基准坐标系, 为扫描仪位姿空间定位提供观测目标. 建立扫描仪坐标映射模型, 基于平差优化技术完成模型的高精度标定. 测量过程中通过移动扫描仪获取多视角精密测量数据, 利用激光跟踪仪完成局部视角位姿的动态跟踪, 结合控制网的坐标观测实现局部视角测量数据的全局标定与数据融合. 实验结果表明, 所提出的组合测量与标定方法有效地拓展了测量空间并控制了全局测量误差, 同时避免了额外标定设备与标定操作的介入对测量工作的干扰.

关键词 组合测量, 测量控制网, 平差优化, 全局标定, 多视数据融合

引用格式 孟彪, 曲学军. 大尺寸复杂形状组合测量系统的全局标定与多视数据融合. 自动化学报, 2017, 43(11): 2051–2060

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160273

Global Calibration and Multi-view Data Fusion for Combination Measurement System of Large Complicate Shapes

MENG Biao¹ QU Xue-Jun²

Abstract To eliminate the contradiction between global measurement and local precision control in 3D digitizing of large complex shapes, a combination measurement scheme is proposed, which is characterized by global control means with large space measuring device, and acquiring detail data with terminal close device, as well as global calibration of the system and data fusion of multi-views. In order to calibrate the global measurement control net, observations are performed at a number of sites to acquire redundant data. They are then fed into an optimization algorithm to precisely position the net. In order to uniquely define the measurement foundation during the whole measuring process, a global measurement coordinate system as well as the physical relation to the control network is setup. By means of fixing a number of observing target points on the scanner, a base coordinate system is built for detecting the pose and orientation of the scanner with the laser tracker. Moreover, a coordinate mapping model of the scanner is established, and its high precision calibration is carried out based on measurement adjustment optimization technology. During the measurement, multi-view shape data detail is obtained through moving the scanner, meanwhile the laser tracker performs on-time positioning and posture detecting of the scanner at each site. Combined with observation of the control net, global calibration of data of each local view and data fusion of them are achieved. Experimental results show that the combination measurement and calibration method proposed can effectively expand the measurement space and control the global measurement error. In addition, it avoids interfering with the measurement, due to the fact that additional calibration equipment and operation are no longer needed.

Key words Combination measurement, measurement control net, adjustment optimization, calibration, multi-view data fusion

Citation Meng Biao, Qu Xue-Jun. Global calibration and multi-view data fusion for combination measurement system of large complicate shapes. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(11): 2051–2060

收稿日期 2016-03-16 录用日期 2016-09-05
Manuscript received March 16, 2016; accepted September 5, 2016

国防基础科研项目 (A0520132009) 资助
Supported by Defense Scientific Research Foundation (A0520132009)

本文责任编辑 潘泉
Recommended by Associate Editor PAN Quan

1. 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点实验室 沈阳 110136
2. 沈阳航空航天大学航空航天工程学部 沈阳 110136

1. Key Defense Laboratory of Aviation Manufacturing Process Digitization, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136
2. Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136

作为柔性装配技术的核心问题, 大尺寸部件空间定位与精密测量从根本上决定了飞机装配精度. 然而该型部件因其尺寸大和形状复杂, 致使量程与精度矛盾突出^[1–2]; 一方面, 测量量程应具有足够的伸缩性以适应测量尺寸的变动; 另一方面, 要求在全量程内保证足够高的局部测量精度、测点密度和测量效率, 以适应法矢与曲率的显著变化. 单一测量手段难以满足上述综合要求, 以大空间测量设备为基

versity, Shenyang 110136

础建立覆盖全测量空间的高精度测量控制网,为全测量过程提供全局坐标控制与约束,再辅以多类型终端近距离测量设备,构建多任务组合测量系统是解决该问题的有效途径^[3].

组合测量中各测量设备的测量范围有限,通过变换测量设备的站位以获取分区域局部测量数据是完成测量控制网的观测与获取完整形状数据的必要手段.相应地,如何完成测量系统的全局标定,进而实现局部测量数据的统一转换就称为组合测量的核心问题.此过程需要经过多次坐标变换与传递,在保证可测性的前提下,缩短坐标传递路线并控制转换精度,实现复杂曲面的快速无干扰测量是提高全局测量精度与保证测量效率的根本途径^[4-5].当前广泛应用的标记点粘贴法因其具有可任意拓展测量空间的优点已获得广泛应用,然而大量标签点的粘贴严重影响了测量效率并干扰了被测物表面形貌^[6].

针对以上问题,本文提出集成多测量设备的组合测量与标定模型,利用多种测量设备在多测站下完成各自观测任务.建立系统测量与标定模型,采用测量平差优化技术完成模型的优化.基于全局控制的映射拼接完成局部测量数据的统一转换,避免顺序拼接方法引起的误差累积,实现测量数据的高精度转换与信息融合.

1 组合测量系统配置

现代飞机气动外形形状复杂,表现为局部法向矢量与曲率变化显著.高精度、高密度的数据点是完整描述其几何特征的必要条件.基于结构光主动视觉的光学三维扫描仪因其全视场测量、测量速度

快、测点密度大、精度高等优点,在众多测量方法中最适于测量复杂形状,然而其视场范围有限^[7].激光跟踪仪能够满足大范围高精度测量要求,易于现场部署并具有实时跟踪与反馈的能力,然而无法满足复杂形状对测量效率和测点密度的综合要求^[8].因此,就测量设备的发展现状而言,采用单一测量方式难以满足大尺寸复杂气动外形的测量要求.近年来,由多种(台)仪器组成的集成测量机制研究成为了热点^[9].各种测量手段在测量范围、精度、速度等属性上有很大不同,通过优化配置,可以扩大测量范围,实现信息互补并使测量结果达到最优.以大空间测量设备为基础和全局控制手段,建立全局坐标控制与约束,再辅以前端近距离测量设备,可以有效解决被测构件整体尺寸大与局部空间形状复杂之间的矛盾,同时具有配置灵活、柔性和适应性好的特点.基于上述分析,我们提出如下测量系统配置方案(见图1):

- 1) 在测量空间布设全局测量控制点以组建精密测量控制网,实现测量空间的全覆盖测量能力.
- 2) 利用激光跟踪仪完成测量控制网的精密定位,建立全局测量坐标系并实现与控制网的几何关联,为全测量过程提供统一的测量基准.
- 3) 根据控制网空间分布和被测形状整体几何特征划分测量区域并布置仪器站位,采用光学三维扫描仪获取多视角局部测量数据.
- 4) 采用激光跟踪仪完成扫描仪位姿的实时跟踪定位,同时完成控制网的观测以实现自身站位的解算,进而利用局部视角的全局标定实现多视数据的统一转换与融合.

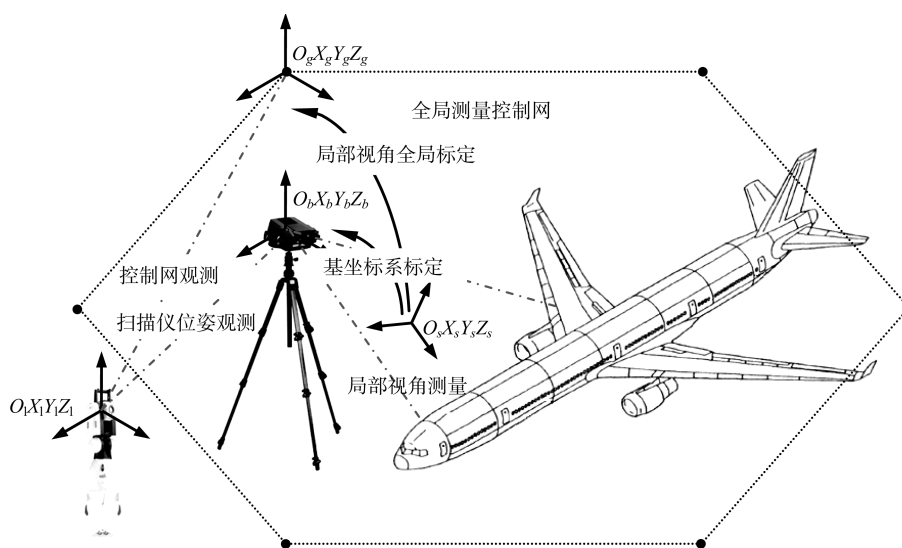


图1 组合系统测量原理

Fig.1 Measurement principle of the combination system

2 全局测量坐标系的精密定位

全局测量与精度控制是大空间精密测量的基础, 通过布设全局控制点以建立覆盖测量现场的高精度测量控制网并实现精确、可靠的测量网标定, 是为全测量过程提供可靠测量基准的最佳途径^[10]. 作为三维坐标测量的重要代表, 激光跟踪仪已成为标定控制网的最直接且约束最强的技术手段. 我们提出采用常规转站测量法获取冗余观测值并完成控制网的初始标定, 在此基础上基于测量平差优化技术完成控制网的精密标定, 最终建立固联控制网的全局测量坐标系并完成控制点的重定位.

2.1 基于常规转站法的控制网预标定

常规控制网标定方法采用转站方式完成: 移动激光跟踪仪以获取多个测量站位, 并以第一站位测量坐标系建立坐标基准; 激光跟踪仪在各站位下完成一定数量的全局控制点的坐标观测; 以两邻接站位间公共目标点的坐标观测值为依据, 以转换后两组数据间距离偏差最小为优化目标, 使用奇异值分解法求解两站位间的坐标定向关系; 采用上述方法将各站位坐标系依次向前一站位转换, 直至转换至第一站位坐标系下; 将各控制点的局部坐标转换至第一站位坐标系中. 显然, 上述过程中每次坐标转换误差都将依次向后传递, 最终产生难以控制的误差累积^[11].

2.2 基于测量平差优化技术的控制网精密标定

完成全局控制点的多站位坐标观测以获取冗余观测数据, 采用平差优化技术对冗余观测值进行优化处理, 可以求解最佳仪器站位与控制点坐标, 从而极大地提高测量控制网标定精度^[12]. 我们提出的测量控制网的平差优化原理如图 2 所示并可描述为: 布设 n 个控制点 $P_i, i = 1, \dots, n$ 以建立测量控制网, 以第一站位测量坐标系为参考轴系 $O_c X_c Y_c Z_c$, 各控制点 P_i 在参考坐标系下的坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) . 变换激光跟踪仪的位姿获取 m 个测量站位, 激光跟踪仪在各站位下对一定数量的控制点 $P_{i(j_k)}$ 进行观测, 获取各站位测量坐标系 $O_k X_k Y_k Z_k$ 下的局部观测值 $\mathbf{p}_{i(j_k)}^k (x_{i(j_k)}^k, y_{i(j_k)}^k, z_{i(j_k)}^k)$, 其中 k 为站位标号, $k = 1, 2, \dots, m, i(j_k)$ 为该站位下观测到的 n_k 个控制点的序号, j_k 为各控制点的索引且 $j_k = 1, 2, \dots, n_k$. 由 $O_k X_k Y_k Z_k$ 到 $O_c X_c Y_c Z_c$ 的转换关系表示为 $T^k (\omega_x^k, \omega_y^k, \omega_z^k, t_x^k, t_y^k, t_z^k)$. 选择各站位下的坐标转换参数 $(\omega_x^k, \omega_y^k, \omega_z^k, t_x^k, t_y^k, t_z^k)$ 以及控制点 $P_{i(j_k)}$ 在 $O_c X_c Y_c Z_c$ 下的坐标 $(X_{i(j_k)}, Y_{i(j_k)}, Z_{i(j_k)})$ 作为平差参数, 则各站位下的坐标观测值应满足以下方程:

$$\mathbf{p}_{i(j_k)}^k = R^k (\omega_x^k, \omega_y^k, \omega_z^k) \cdot \mathbf{P}_{i(j_k)} + \mathbf{M}^k (t_x^k, t_y^k, t_z^k) \quad (1)$$

式中 R^k 为以绕三个坐标轴旋转的欧拉角 ω_x^k, ω_y^k 和 ω_z^k 表示的旋转变换矩阵, $\mathbf{M}^k$ 为以三个平移分量 t_x^k, t_y^k, t_z^k 表示的平移向量, T^k 为两坐标系间的齐次坐标变换矩阵, T^k 与 R^k 和 $\mathbf{M}^k$ 具有严格的对应关系:

$$T^k (\omega_x, \omega_y, \omega_z, t_x, t_y, t_z) = \begin{bmatrix} R^k (\omega_x^k, \omega_y^k, \omega_z^k) & \mathbf{M}^k (t_x^k, t_y^k, t_z^k) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

考虑到观测误差的影响, 该式改写为:

$$\mathbf{p}_{i(j_k)}^k + \Delta \mathbf{p}_{i(j_k)}^k = \tilde{R}^k (\tilde{\omega}_x^k, \tilde{\omega}_y^k, \tilde{\omega}_z^k) \cdot \tilde{\mathbf{P}}_{i(j_k)} + \tilde{\mathbf{M}}^k (\tilde{t}_x^k, \tilde{t}_y^k, \tilde{t}_z^k) \quad (2)$$

式中 $\Delta \mathbf{p}_{i(j_k)}^k (\Delta x_{i(j_k)}^k, \Delta y_{i(j_k)}^k, \Delta z_{i(j_k)}^k)$ 为坐标观测值 $\mathbf{p}_{i(j_k)}^k$ 的改正值, $\tilde{R}^k (\tilde{\omega}_x^k, \tilde{\omega}_y^k, \tilde{\omega}_z^k)$ 与 $\tilde{\mathbf{M}}^k (\tilde{t}_x^k, \tilde{t}_y^k, \tilde{t}_z^k)$ 为坐标变换关系的平差优化值, $\tilde{\mathbf{P}}_{i(j_k)} (\tilde{X}_{i(j_k)}, \tilde{Y}_{i(j_k)}, \tilde{Z}_{i(j_k)})$ 为控制点在参考坐标系中的平差优化值, 且有

$$\begin{cases} (\tilde{\omega}_x^k, \tilde{\omega}_y^k, \tilde{\omega}_z^k, \tilde{t}_x^k, \tilde{t}_y^k, \tilde{t}_z^k) = \\ (\omega_x^k, \omega_y^k, \omega_z^k, t_x^k, t_y^k, t_z^k) + (\hat{\omega}_x^k, \hat{\omega}_y^k, \hat{\omega}_z^k, \hat{t}_x^k, \hat{t}_y^k, \hat{t}_z^k) \\ (\tilde{X}_{i(j_k)}, \tilde{Y}_{i(j_k)}, \tilde{Z}_{i(j_k)}) = \\ (X_{i(j_k)}, Y_{i(j_k)}, Z_{i(j_k)}) + (\hat{X}_{i(j_k)}, \hat{Y}_{i(j_k)}, \hat{Z}_{i(j_k)}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $(\hat{\omega}_x^k, \hat{\omega}_y^k, \hat{\omega}_z^k, \hat{t}_x^k, \hat{t}_y^k, \hat{t}_z^k)$ 和 $(\hat{X}_{i(j_k)}, \hat{Y}_{i(j_k)}, \hat{Z}_{i(j_k)})$ 为各平差参数的改正值.

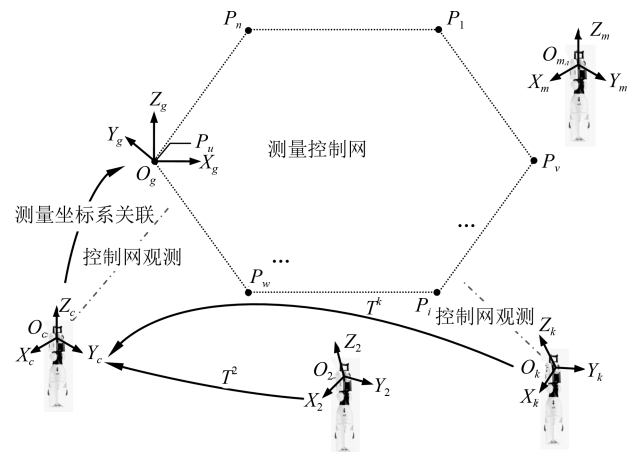


图 2 控制网平差优化原理

Fig. 2 The adjustment optimization principle of the control net

基于最小二乘原理, 将所有测站下的观测误差方程联立, 并以各观测误差平方和最小为目标构建平差

目标函数:

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{j_k=1}^{n_k} (\Delta p_{i(j_k)}^k)^2 \quad (4)$$

求解此平差优化问题, 获取平差参数改正值 $(\hat{\omega}_x^k, \hat{\omega}_y^k, \hat{\omega}_z^k, \hat{t}_x^k, \hat{t}_y^k, \hat{t}_z^k)$ 和 $(\hat{X}_{i(j_k)}, \hat{Y}_{i(j_k)}, \hat{Z}_{i(j_k)})$, 以及坐标观测改正值 $\Delta p_{i(j_k)}^k$, 进而利用式 (3) 求解优化后各站位下位姿转换关系 $\tilde{T}^k$ 及控制点全局坐标 $(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i)$ 的平差值, 实现控制网的精确定位以及各测站位姿的优化解算。

2.3 全局测量坐标系的建立与数据转换

制造过程中控制网的标定需频繁进行, 以适应现场环境的变化并保证测量精度. 前述标定过程将参考坐标系与某个测量站位相关联, 必将造成不同标定过程中的测量基准随站位布置的不同而变动. 相应地不同标定过程中获取的测量数据就缺乏统一的参考基准, 从而无法进行数据统一与比较分析. 建立全局测量坐标系与全局控制网的几何关联, 由于实现了基准定义的空间唯一性, 将为实现测量数据与设计制造基准的关联, 以及实现基于测量数据与产品理论模型的对比计算与工程分析提供依据。

根据控制点的空间分布 (见图 2), 采用 “3-2-1” 原则建立全局测量坐标系, 其原理可简述为: 采用三点建立一个坐标平面, 将第一个与第二个坐标轴定位于该平面内, 则第三个坐标轴即为该平面的法向矢量. 取其中两点连线建立第一个坐标轴, 则第二个坐标轴可由其余两个坐标轴的叉积矢量确定, 方向取反. 取第一个坐标轴的起点定位坐标系原点. 以此为基础, 提出如下的坐标转换方法: 设所选取三点为 P_u 、 P_v 、 P_w , 选择 P_u 作为坐标原点 O_g , 则从参考坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 到全局测量坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$ 的平移向量 T 取为:

$$T = -P_u \quad (5)$$

以 P_u 、 P_v 、 P_w 所在平面建立坐标平面 $O_g X_g Y_g$, 则 $O_g Z_g$ 轴单位方向矢量 d_Z 取为:

$$d_Z = \frac{(P_v - P_u) \times (P_w - P_u)}{|(P_v - P_u) \times (P_w - P_u)|} \quad (6)$$

以 P_u 与 P_v 的连线建立坐标轴 $O_g X_g$, 其单位方向矢量 d_X 取为:

$$d_X = \frac{P_v - P_u}{|P_v - P_u|} \quad (7)$$

显然 $O_g Y_g$ 轴单位方向 d_Y 矢量应取为:

$$d_Y = \frac{d_Z \times d_X}{|d_Z \times d_X|} \quad (8)$$

根据上述方法确定全局测量坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$ 的三个轴向矢量 $e_X = [1 \ 0 \ 0]$, $e_Y = [0 \ 1 \ 0]$ 和 $e_Z = [0 \ 0 \ 1]$ 在参考轴系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 中的坐标 d_X , d_Y , d_Z , 基于式 (9) 计算两坐标系间的坐标转换关系 R :

$$\begin{cases} d_X = R \cdot e_X \\ d_Y = R \cdot e_Y \\ d_Z = R \cdot e_Z \end{cases} \quad (9)$$

根据所建立的坐标转换关系 R 和 T , 将全局控制点坐标转换到测量坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$ 中:

$$P_i^* = R \cdot (P_i + T), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

3 扫描仪坐标映射模型及其位姿观测

完成分区域测量数据从局部视角测量坐标系向全局测量坐标系的转换是全局标定的根本任务, 也是保障整体测量精度的关键环节. 本质上, 不同坐标系之间均是利用公共目标的各自观测值来建立相互坐标映射关系. 然而由于不同类型设备的观测特性不同, 致使各自观测目标难以为对方所识别. 显然, 设计加工集成多类型观测目标的专用标定靶就成为实现相关功能的可行手段^[13]. 然而, 借助专用标定靶的常规标定过程对于每次局部测量操作都要进行, 其间需要完成标定靶的摆放, 并利用多种测量设备完成标定目标的识别与坐标观测. 而且, 标定操作的质量影响了测量不确定度, 同时干扰了测量工作。

如能利用跟踪仪的动态跟踪特性完成扫描仪位姿的实时定位, 进一步结合跟踪仪对全局控制网的观测实现局部视角测量坐标系向全局测量坐标系的转换, 将避免测量过程中标定靶标的介入与标定操作, 并有效地提高了测量的自动化与效率. 为此我们提出通过在扫描仪固定机构上设置跟踪仪观测目标, 据此定义基准坐标系的扫描仪位姿观测基准建立方法. 进而提出构建扫描仪基坐标系与测量坐标系间的坐标映射模型, 以及利用测量平差优化技术完成映射模型的高精度标定方法. 测量过程中采用激光跟踪仪完成基坐标系的实时观测, 为扫描仪的位姿跟踪提供坐标参考。

3.1 扫描仪坐标映射关系的模型描述

如图 3 所示, 在扫描仪测头固定机构上安装一定数量的跟踪仪观测目标点 Q_{ib} , $ib = 1, 2, \dots, nb$ 并建立基坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$, Q_{ib} 在 $O_b X_b Y_b Z_b$ 中的坐标记为 (X_{ib}, Y_{ib}, Z_{ib}) . 建立扫描仪坐标映射模型, 实现测量数据从扫描仪基坐标系到测量坐标系坐标转换关系的数学描述. 在测量过程中, 激光跟踪仪通过基坐标系目标点的坐标观测并将观测结果输入扫描仪坐标映射模型, 完成扫描仪位姿的定位跟踪。

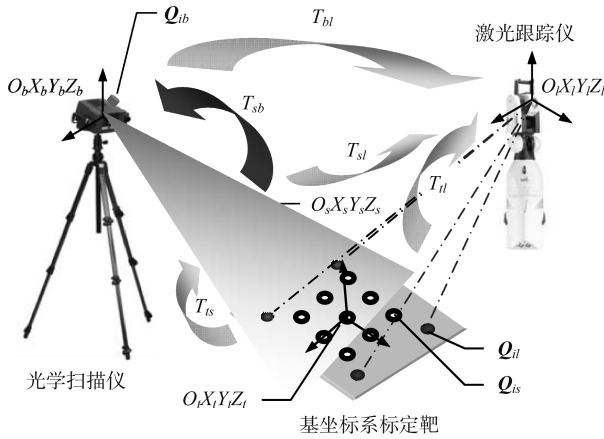


图3 基坐标系标定原理
Fig.3 Principle of calibration for the base coordinate system

进一步设计基坐标系标定靶并建立靶标坐标系 $O_t X_t Y_t Z_t$. 在标定靶上布置两组目标点, 一组为扫描仪观测目标点 Q_{is} , $is = 1, 2, \dots, ns$, 另一组是跟踪仪观测目标点 Q_{il} , $il = 1, 2, \dots, nl$. 两组目标点中心在 $O_t X_t Y_t Z_t$ 上的坐标分别记为 (X_{is}, Y_{is}, Z_{is}) 与 (X_{il}, Y_{il}, Z_{il}) , 在标定过程中分别为各自的测量设备所识别与观测. 设目标点 Q_{il} 在跟踪仪测量坐标系 $O_l X_l Y_l Z_l$ 下的观测数据为 P_{il} , 则可建立以下观测方程:

$$P_{il} = R_{tl} Q_{il} + M_{tl}, \quad il = 1, 2, \dots, nl \quad (11)$$

并由该方程求解 $O_t X_t Y_t Z_t$ 与 $O_l X_l Y_l Z_l$ 间的旋转变换矩阵与平移向量 R_{tl} 与 M_{tl} . 同样, 设扫描仪目标点 Q_{is} 在扫描仪测量坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 下观测数据 P_{is} , 则可建立以下观测方程:

$$P_{is} = R_{ts} Q_{is} + M_{ts}, \quad is = 1, 2, \dots, ns \quad (12)$$

并由该方程求解 $O_t X_t Y_t Z_t$ 与 $O_s X_s Y_s Z_s$ 间的旋转变换矩阵与平移向量 R_{ts} 与 M_{ts} .

显然, 跟踪仪测量坐标系 $O_l X_l Y_l Z_l$ 与扫描仪测量坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 间的坐标变换矩阵 T_{ls} 可由下式确定:

$$T_{ls} = T_{tl}^{-1} \times T_{ts} \quad (13)$$

与此同时, 跟踪仪完成对基坐标系目标点的观测, 设基坐标系目标点 Q_{ib} 在 $O_l X_l Y_l Z_l$ 下的观测数据为 P_{ib} , 则可建立以下观测方程:

$$P_{ib} = R_{bl} Q_{ib} + M_{bl}, \quad ib = 1, 2, \dots, nb \quad (14)$$

并由该方程求解 $O_l X_l Y_l Z_l$ 与 $O_b X_b Y_b Z_b$ 间的旋转变换矩阵与平移向量 R_{bl} 与 M_{bl} .

综合以上结果, 光学扫描仪测量坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 与基坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 间的坐标变换

关系 T_{sb} 由下式求解:

$$T_{sb} = T_{bl} \times T_{sl}^{-1} = T_{bl} \times T_{tl}^{-1} \times T_{ts} \quad (15)$$

3.2 扫描仪坐标映射模型标定与平差优化

扫描仪坐标映射模型的标定在测量操作之前完成, 测量过程中不再进行, 故其标定精度就成为影响全局测量精度的关键因素. 本文提出通过变换标定系统组件的相对位姿以获取冗余观测数据, 在此基础上, 采用测量平差优化技术以有效提高标定精度.

3.2.1 坐标映射模型标定的局部平差优化

改变激光跟踪仪、光学扫描仪及基坐标系标定靶的相对位置与角度 m 次, 获取对应的标定站位 (即上述标定组件的当前位置状态). 在各标定站位下, 各测量设备完成各自目标的观测以获取冗余观测数据. 在此基础上, 对于式 (15) 中建立的扫描仪坐标映射模型, 将其中包含的坐标转换关系的解算视为三个独立的标定过程并分别描述为:

1) 坐标转换关系 T_{ts}^k 的平差优化

光学扫描仪在 m 个站位下对标定靶上 ns 个目标点 Q_{is} 进行测量, 获取的观测值为 $P_{is}^k = (x_{is}^k, y_{is}^k, z_{is}^k)$; $k = 1, \dots, m$; $is = 1, \dots, ns$. 各站位下扫描仪测量坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 与靶标坐标系 $O_t X_t Y_t Z_t$ 间的转换关系表示为 T_{ts}^k . 选择各站位下坐标转换参数 $(\omega_{ts,x}^k, \omega_{ts,y}^k, \omega_{ts,z}^k, t_{ts,x}^k, t_{ts,y}^k, t_{ts,z}^k)$ 以及 Q_{is} 在 $O_t X_t Y_t Z_t$ 上的坐标 (X_{is}, Y_{is}, Z_{is}) 作为平差参数, 建立以各观测值误差项平方和最小为目标的平差目标函数:

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{is=1}^{ns} |\Delta P_{st}^k|^2 \quad (16)$$

求解此最优化问题, 获取各站位下平差参数改正值 $(\hat{\omega}_{ts,x}^k, \hat{\omega}_{ts,y}^k, \hat{\omega}_{ts,z}^k, \hat{t}_{ts,x}^k, \hat{t}_{ts,y}^k, \hat{t}_{ts,z}^k)$ 和 $(\hat{X}_{is}, \hat{Y}_{is}, \hat{Z}_{is})$, 以及观测值改正数 $\Delta P_{is}^k = (\Delta x_{is}^k, \Delta y_{is}^k, \Delta z_{is}^k)$, 进而利用式 (17) 求解优化后各站位下位姿转换关系 $\tilde{T}_{ts}^k(\tilde{\omega}_{ts,x}^k, \tilde{\omega}_{ts,y}^k, \tilde{\omega}_{ts,z}^k, \tilde{t}_{ts,x}^k, \tilde{t}_{ts,y}^k, \tilde{t}_{ts,z}^k)$ 及坐标 $(\tilde{X}_{is}, \tilde{Y}_{is}, \tilde{Z}_{is})$:

$$\begin{cases} (\tilde{\omega}_{ts,x}^k, \tilde{\omega}_{ts,y}^k, \tilde{\omega}_{ts,z}^k, \tilde{t}_{ts,x}^k, \tilde{t}_{ts,y}^k, \tilde{t}_{ts,z}^k) = \\ (\omega_{ts,x}^k, \omega_{ts,y}^k, \omega_{ts,z}^k, t_{ts,x}^k, t_{ts,y}^k, t_{ts,z}^k) = \\ (\hat{\omega}_{ts,x}^k, \hat{\omega}_{ts,y}^k, \hat{\omega}_{ts,z}^k, \hat{t}_{ts,x}^k, \hat{t}_{ts,y}^k, \hat{t}_{ts,z}^k) \\ (\tilde{X}_{is}, \tilde{Y}_{is}, \tilde{Z}_{is}) = (X_{is}, Y_{is}, Z_{is}) = (\hat{X}_{is}, \hat{Y}_{is}, \hat{Z}_{is}) \end{cases} \quad (17)$$

2) 坐标转换关系 T_{tl}^k 的平差优化

激光跟踪仪在 m 个站位下对标定靶上的 nl 个标志点 Q_{il} 进行测量, 获取观测值为 $p_{il}^k = (x_{il}^k, y_{il}^k, z_{il}^k)$; $k = 1, 2, \dots, m$; $il = 1, \dots, nl$. 各站位下跟踪仪测量坐标系 $O_l X_l Y_l Z_l$

与靶标坐标系 $O_t X_t Y_t Z_t$ 间的转换关系表示为 T_{tl}^k . 选择各站位下两坐标系间坐标转换参数 $(\omega_{ts,x}^k, \omega_{ts,y}^k, \omega_{ts,z}^k, t_{ts,x}^k, t_{ts,y}^k, t_{ts,z}^k)$, 以及 Q_{il} 在 $O_t X_t Y_t Z_t$ 上的坐标 (X_{il}, Y_{il}, Z_{il}) 作为平差参数, 建立各测站下目标点的观测误差平方和为最小的目标函数:

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{il=1}^{nl} |\Delta p_{il}^k|^2 \quad (18)$$

求解此平差优化问题, 获取各站位下平差参数改正值 $(\hat{\omega}_{tl,x}^k, \hat{\omega}_{tl,y}^k, \hat{\omega}_{tl,z}^k, \hat{t}_{tl,x}^k, \hat{t}_{tl,y}^k, \hat{t}_{tl,z}^k)$ 和 $\hat{X}_{il}, \hat{Y}_{il}, \hat{Z}_{il}$, 以及观测值改正数 $\Delta p_{il}^k = (\Delta x_{il}^k, \Delta y_{il}^k, \Delta z_{il}^k)$, 进而利用式 (19) 求解优化后各站位下位姿转换关系 $\tilde{T}_{tl}^k(\tilde{\omega}_{tl,x}^k, \tilde{\omega}_{tl,y}^k, \tilde{\omega}_{tl,z}^k, \tilde{t}_{tl,x}^k, \tilde{t}_{tl,y}^k, \tilde{t}_{tl,z}^k)$ 及坐标 $(\tilde{X}_{il}, \tilde{Y}_{il}, \tilde{Z}_{il})$:

$$\begin{cases} (\tilde{\omega}_{tl,x}^k, \tilde{\omega}_{tl,y}^k, \tilde{\omega}_{tl,z}^k, \tilde{t}_{tl,x}^k, \tilde{t}_{tl,y}^k, \tilde{t}_{tl,z}^k) = \\ (\omega_{tl,x}^k, \omega_{tl,y}^k, \omega_{tl,z}^k, t_{tl,x}^k, t_{tl,y}^k, t_{tl,z}^k) = \\ (\hat{\omega}_{tl,x}^k, \hat{\omega}_{tl,y}^k, \hat{\omega}_{tl,z}^k, \hat{t}_{tl,x}^k, \hat{t}_{tl,y}^k, \hat{t}_{tl,z}^k) \\ (\tilde{X}_{il}, \tilde{Y}_{il}, \tilde{Z}_{il}) = (X_{il}, Y_{il}, Z_{il}) = (\hat{X}_{il}, \hat{Y}_{il}, \hat{Z}_{il}) \end{cases} \quad (19)$$

3) 坐标转换关系 T_{bl}^k 的平差优化

激光跟踪仪在 m 个站位下对目标靶上的 nb 个目标点 Q_{ib} 进行测量, 获取的观测值为 $p_{ib}^k = (x_{ib}^k, y_{ib}^k, z_{ib}^k)$; $ib = 1, \dots, nb, k = 1, 2, \dots, m$. 各站位下跟踪仪测量坐标系 $O_l X_l Y_l Z_l$ 与基坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 间的转换关系表示为 T_{bl}^k . 选择各站位下的坐标转换参数 $(\omega_{bl,x}^k, \omega_{bl,y}^k, \omega_{bl,z}^k, t_{bl,x}^k, t_{bl,y}^k, t_{bl,z}^k)$ 以及 Q_{ib} 在 $O_b X_b Y_b Z_b$ 上的坐标 (X_{ib}, Y_{ib}, Z_{ib}) 作为平差参数, 建立各站位下标志点的观测误差平方和为最小的目标函数:

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{ib=1}^{nb} |\Delta p_{ib}^k|^2 \quad (20)$$

求解此最优化问题, 获取各站位下平差参数改正值 $(\hat{\omega}_{bl,x}^k, \hat{\omega}_{bl,y}^k, \hat{\omega}_{bl,z}^k, \hat{t}_{bl,x}^k, \hat{t}_{bl,y}^k, \hat{t}_{bl,z}^k)$ 和 $\hat{X}_{ib}, \hat{Y}_{ib}, \hat{Z}_{ib}$, 以及观测值改正数 $\Delta p_{ib}^k = (\Delta x_{ib}^k, \Delta y_{ib}^k, \Delta z_{ib}^k)$, 进而利用式 (21) 求解优化后各站位下位姿转换参数 $\tilde{T}_{bl}^k(\tilde{\omega}_{bl,x}^k, \tilde{\omega}_{bl,y}^k, \tilde{\omega}_{bl,z}^k, \tilde{t}_{bl,x}^k, \tilde{t}_{bl,y}^k, \tilde{t}_{bl,z}^k)$ 及坐标 $(\tilde{X}_{ib}, \tilde{Y}_{ib}, \tilde{Z}_{ib})$:

$$\begin{cases} (\tilde{\omega}_{bl,x}^k, \tilde{\omega}_{bl,y}^k, \tilde{\omega}_{bl,z}^k, \tilde{t}_{bl,x}^k, \tilde{t}_{bl,y}^k, \tilde{t}_{bl,z}^k) = \\ (\omega_{bl,x}^k, \omega_{bl,y}^k, \omega_{bl,z}^k, t_{bl,x}^k, t_{bl,y}^k, t_{bl,z}^k) = \\ (\hat{\omega}_{bl,x}^k, \hat{\omega}_{bl,y}^k, \hat{\omega}_{bl,z}^k, \hat{t}_{bl,x}^k, \hat{t}_{bl,y}^k, \hat{t}_{bl,z}^k) \\ (\tilde{X}_{ib}, \tilde{Y}_{ib}, \tilde{Z}_{ib}) = (X_{ib}, Y_{ib}, Z_{ib}) = (\hat{X}_{ib}, \hat{Y}_{ib}, \hat{Z}_{ib}) \end{cases} \quad (21)$$

4) 基于平均值法的坐标映射模型解算

对于式 (15) 所列出的扫描仪坐标映射模型, 各站位下的标定结果可按下式解算:

$$\tilde{T}_{sb}^k = (\tilde{T}_{bl}^k)^{-1} \times \tilde{T}_{tl}^k \times (\tilde{T}_{ts}^k)^{-1}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

不同站位下各标定组件的相对位姿不同, 所获取的中介坐标转换关系 T_{tl}^k 、 T_{ts}^k 和 T_{bl}^k 也随之不同. 在不存在观测误差的情况下, 无论标定系统的位姿如何变化, 基坐标系标定结果应保持不变. 而在考虑观测误差的情况下, 各站位下的标定过程可视为对同一目标的等精度独立观测. 因此, 最佳标定结果可取为各站位标定结果的算数平均值, 即:

$$\tilde{T}_{sb} = \frac{\sum_{k=1}^m \tilde{T}_{sb}^k}{m} \quad (23)$$

根据测量平差优化理论, 如单站位下的标定精度为 σ , 则算数平均值 $\tilde{T}_{sb}$ 的标准差为^[8]:

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{m}} \sigma \quad (24)$$

显然可以通过增加站位数量来提高标定精度. 然而, 随着站位次数的增加, 平均值法计算结果的精度提高趋于缓慢. 同时标定次数的增多会增加操作难度并降低标定效率, 随之带来测量条件不稳定会产生新的误差来源. 因此, 观测次数的选择应在标定效率与精度之间综合考虑.

3.2.2 一致性准则的建立与整体平差优化

观测误差的存在使各站位下的基坐标系标定结果存在一定程度的不一致性, 算数平均值法虽降低了该差异, 但仍不能从根本上消除. 以各站位下局部标定结果一致性为依据构建条件方程, 形成坐标转换关系的整体平差优化模型则能进一步提高标定精度. 为此, 综合选定各站位下所有坐标变换参数 $(\tilde{\omega}_{tl,x}^k, \tilde{\omega}_{tl,y}^k, \tilde{\omega}_{tl,z}^k, \tilde{t}_{tl,x}^k, \tilde{t}_{tl,y}^k, \tilde{t}_{tl,z}^k, \tilde{\omega}_{ts,x}^k, \tilde{\omega}_{ts,y}^k, \tilde{\omega}_{ts,z}^k, \tilde{t}_{ts,x}^k, \tilde{t}_{ts,y}^k, \tilde{t}_{ts,z}^k, \tilde{\omega}_{bl,x}^k, \tilde{\omega}_{bl,y}^k, \tilde{\omega}_{bl,z}^k, \tilde{t}_{bl,x}^k, \tilde{t}_{bl,y}^k, \tilde{t}_{bl,z}^k)$, $k = 1, 2, \dots, m$, 以及观测目标点在靶标坐标系下的坐标 $(\tilde{X}_{is}, \tilde{Y}_{is}, \tilde{Z}_{is})$, $is = 1, \dots, ns$; $\tilde{X}_{il}, \tilde{Y}_{il}, \tilde{Z}_{il}$, $il = 1, \dots, nl$; $\tilde{X}_{ib}, \tilde{Y}_{ib}, \tilde{Z}_{ib}$, $ib = 1, \dots, nb$ 作为联合平差参数, 建立综合优化目标函数, 即:

$$\min \sum_{k=1}^m \left[\sum_{is=1}^{ns} (\Delta p_{st}^k)^2 + \sum_{il=1}^{nl} (\Delta p_{il}^k)^2 + \sum_{ib=1}^{nb} (\Delta p_{ib}^k)^2 \right] \quad (25)$$

并以不同标定站位下基坐标系标定结果不变为条件, 建立条件方程:

$$\tilde{T}_{sb}^k = \tilde{T}_{sb}^1, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (26)$$

即:

$$\begin{aligned} & \left[\tilde{T}_{bl}^k(\tilde{\omega}_{bl,x}^k, \tilde{\omega}_{bl,y}^k, \tilde{\omega}_{bl,z}^k, \tilde{t}_{bl,x}^k, \tilde{t}_{bl,y}^k, \tilde{t}_{bl,z}^k) \right]^{-1} \times \\ & \tilde{T}_{tl}^k(\tilde{\omega}_{tl,x}^k, \tilde{\omega}_{tl,y}^k, \tilde{\omega}_{tl,z}^k, \tilde{t}_{tl,x}^k, \tilde{t}_{tl,y}^k, \tilde{t}_{tl,z}^k) \times \\ & \left[\tilde{T}_{ts}^k(\tilde{\omega}_{ts,x}^k, \tilde{\omega}_{ts,y}^k, \tilde{\omega}_{ts,z}^k, \tilde{t}_{ts,x}^k, \tilde{t}_{ts,y}^k, \tilde{t}_{ts,z}^k) \right]^{-1} = \\ & \left[\tilde{T}_{bl}^1(\tilde{\omega}_{bl,x}^1, \tilde{\omega}_{bl,y}^1, \tilde{\omega}_{bl,z}^1, \tilde{t}_{bl,x}^1, \tilde{t}_{bl,y}^1, \tilde{t}_{bl,z}^1) \right]^{-1} \times \\ & \tilde{T}_{tl}^1(\tilde{\omega}_{tl,x}^1, \tilde{\omega}_{tl,y}^1, \tilde{\omega}_{tl,z}^1, \tilde{t}_{tl,x}^1, \tilde{t}_{tl,y}^1, \tilde{t}_{tl,z}^1) \times \\ & \left[\tilde{T}_{ts}^1(\tilde{\omega}_{ts,x}^1, \tilde{\omega}_{ts,y}^1, \tilde{\omega}_{ts,z}^1, \tilde{t}_{ts,x}^1, \tilde{t}_{ts,y}^1, \tilde{t}_{ts,z}^1) \right]^{-1} \quad (27) \end{aligned}$$

求解此附加限制条件的间接平差函数模型, 可获得观测值的改正数和平差参数的改正数以及平差值. 显然, 上述限制条件消除了不同站位下基坐标系标定结果的差异, 最终标定结果可取为:

$$\tilde{T}_{sb} = \left[\tilde{T}_{bl}^1 \right]^{-1} \times \tilde{T}_{tl}^1 \times \left[\tilde{T}_{ts}^1 \right]^{-1} \quad (28)$$

4 全局标定与多视数据对齐

测量过程中扫描仪从不同方位接近被测形状, 获取各视角下的局部测量数据. 相应地, 激光跟踪仪通过对扫描仪基坐标系的观测获取自身测量坐标系下的扫描仪的位姿 T_{sl}^i , 结合基坐标系标定结果 T_{sb} , 实现扫描仪测量坐标系向跟踪仪测量坐标系的转换;

$$\tilde{T}_{sl}^i = \tilde{T}_{sl}^i \times \tilde{T}_{sb}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (29)$$

式中 i 为局部视角编号, n 为视角数量.

与此同时, 激光跟踪仪通过对控制网的观测完成自身站位位姿的标定, 获取其测量坐标系与全局测量坐标系间的坐标变换关系 $T_{j(i)}$, 其中 $j(i)$ 为与第 i 个视角对应的跟踪仪站位编号. 结合式 (29) 建立的扫描仪位姿跟踪结果, 获取局部视角测量坐标系向全局测量坐标系的转换关系:

$$T_{sg}^i = T_{sl}^i \times T_{j(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

利用式 (30) 建立的全局坐标映射关系, 将以齐次坐标表示的各局部视角测量数据 Ω^i 统一转换至全局测量坐标系下:

$$\Omega_g^i = T_{j(i)} \times \Omega^i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (31)$$

5 实验与分析

5.1 测量控制网的平差优化与全局测量坐标系的精密定位

在测量现场布设 8 个控制点 $P_i, i = 1, 2, \dots, 8$ 建立全局测量控制网, 采用激光跟踪仪 Leica AT901-LR 在 10 个站位下对各控制点进行坐标观测获取冗余观测数据, 基于常规转站方法完成控制网的初始标定与冗余观测. 进一步利用冗余观测数据建立控制网平差目标函数并完成控制网的精确标定. 选取其中的三个控制点 P_3, P_5, P_8 建立全局测量坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$, 参考坐标系下 (第一站位坐标系) 下各控制点坐标的平差优化值 $(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i, \tilde{Z}_i)$ 与对应的坐标改正值 $(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i)$, 以及转换至全局测量坐标系下的控制点坐标值 (X_i^g, Y_i^g, Z_i^g) 如表 1 所示.

所建立的全局测量坐标系, 以及在该坐标系下定位的全局控制点与各站位位姿见图 4.

表 1 全局控制点坐标平差优化值及其改正值 (mm)

Table 1 Adjustment optimization data and correction data of global control points (mm)

点标号 i	$(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i, \tilde{Z}_i)$	$(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i)$	(X_i^g, Y_i^g, Z_i^g)
1	(12 252.98, 322.26, 4 504.09)	(0.0486, -0.0426, -0.0299)	(1 076.31, 16 337.32, 2 945.28)
2	(8 945.73, 9 267.59, 2 873.47)	(0.0965, -0.0399, 0.0369)	(-3 016, 8 188.10, -289.44)
3	(965.34, 12 538.02, 4 226.69)	(-0.0569, 0.0989, -0.0696)	(0, 0, 0)
4	(-8 322.58, 9 342.42, 3 693.69)	(-0.0545, 0.0086, 0.0180)	(8 725.40, -4 496.77, -637.45)
5	(-11 840.10, -966.31, 2 930.69)	(0.0270, 0.0891, 0.0735)	(18 655.78, 0, 0)
6	(-9 244.90, -7 760.16, 1 234.16)	(0.0514, -0.0918, 0.0151)	(21 908.71, 6 708.09, -430.51)
7	(-31.87, -11 310.17, 3 332.17)	(-0.0643, 0.0806, 0.0671)	(18 010.96, 15 437.26, 2 807.94)
8	(7 904.81, -8 381.42, 417.06)	(-0.0695, 0.0144, -0.0519)	(10 644.53, 19 671.15, 0)

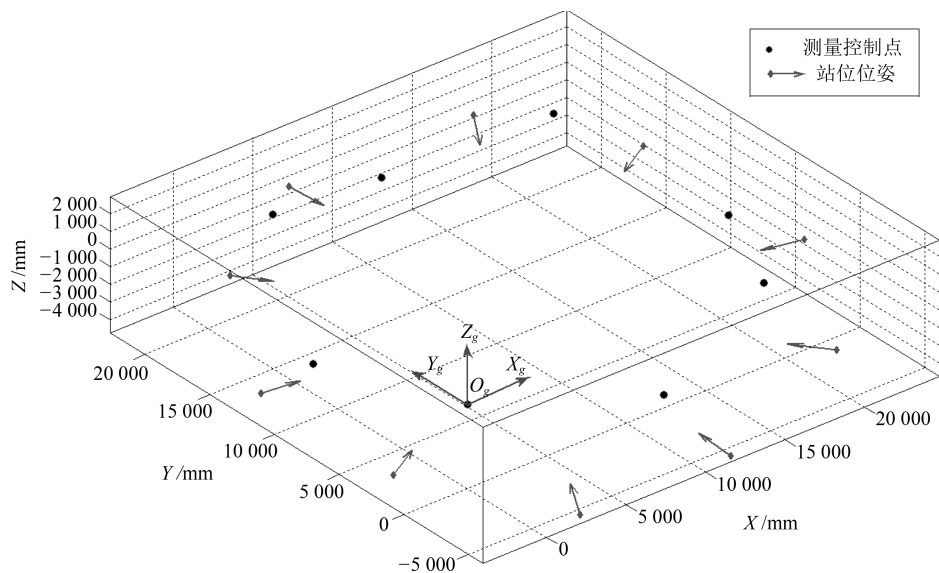


图 4 全局测量控制网的精密定位与建立的全局测量坐标系

Fig. 4 Positioning of the global measurement control net and the global measurement coordinate system being build

为评价平差优化方法的有效性,对于基于转站测量与整体平差优化这两种控制网标定方法,以各站位下控制点坐标观测值相对控制点坐标标定值的距离偏差作为统计指标,统计偏差值标准差的平均值,对比结果如图 5 所示. 图中 $\text{std}(X1)$ 、 $\text{std}(Y1)$ 、 $\text{std}(Z1)$ 表示转站测量标定法在各坐标分量上的偏差指标, $\text{std}(X2)$ 、 $\text{std}(Y2)$ 、 $\text{std}(Z2)$ 表示优化平差标定法在各坐标分量上的偏差指标. 结果表明,相对于转站测量标定法,整体平差优化后各控制点定位精度均发生显著改善.

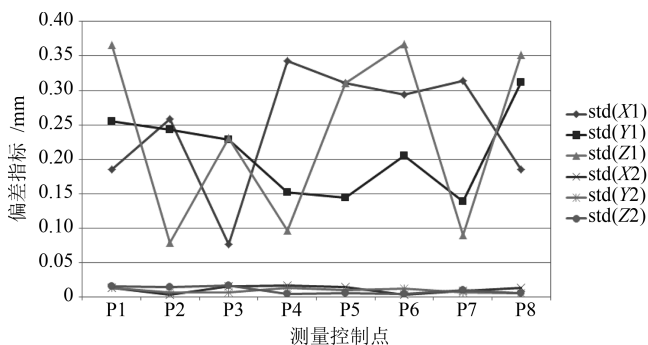


图 5 两种标定方法偏差指标的对比分析结果

Fig. 5 Comparison of deviation of two calibration methods

5.2 扫描仪坐标映射模型标定实验分析

采用光学三维扫描仪与激光跟踪仪组建联合标定系统,其中激光跟踪仪为 Leica AT901-R,其测距标准差 $\sigma_l = 10\text{ }\mu\text{m}$,测角标准差 $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 1''$. 光学扫描仪为 GOM 公司的 Atos compact II,各坐标

测量标准差均为 $30\text{ }\mu\text{m}$. 标定过程中,通过变换激光跟踪仪、光学扫描仪和标定靶的相对位姿,获取 10 个标定站位 $k = 1, 2, \dots, 10$. 采用局部平差优化方法,获取各站位下的中介坐标转换关系 $\tilde{T}_{tl}^k$ 、 $\tilde{T}_{ts}^k$ 、 $\tilde{T}_{bl}^k$ 及基坐标系标定结果 $\tilde{T}_{sb}^k$ 的平差优化值见表 2.

表 2 局部平差优化结果

Table 2 Local adjustment optimization results

k	$\omega_x^k (^\circ)$	$\omega_y^k (^\circ)$	$\omega_z^k (^\circ)$	$t_x^k (\text{mm})$	$t_y^k (\text{mm})$	$t_z^k (\text{mm})$
1	2.476	6.158	-1.404	-19.584	-35.066	279.667
2	2.481	6.154	-1.408	-19.273	-34.968	279.514
3	2.487	6.159	-1.403	-19.393	-34.865	279.604
4	2.485	6.167	-1.395	-19.421	-35.083	279.424
5	2.494	6.149	-1.413	-19.345	-35.181	279.514
6	2.495	6.144	-1.418	-19.719	-34.976	279.426
7	2.492	6.155	-1.407	-19.472	-35.186	279.678
8	2.500	6.154	-1.408	-19.668	-35.155	279.779
9	2.492	6.148	-1.414	-19.586	-34.941	279.689
10	2.493	6.157	-1.405	-19.55	-35.169	279.652

采用 3.2 节中所述基于平均值法的局部平差优化方法完成各站位标定结果的综合,形成标定结果数据 $\tilde{T}_{sb}$ 的坐标变换参数为 $(2.49002, 6.1550, -1.4078, -19.501, -35.059, 279.594)$.

以表 2 中列出的 10 组单站位标定结果为依据,采用以下方法对站位数量下平均值法的标定精度进行模拟统计分析. 假定待分析标定站位数量为 k , $k = 1, 2, \dots, 10$, 采用排列组合方法,从 10 组标定结果数据中任取其中的 k 组数据. 对于其中的每一组合,利用平均值法求解该组合下的标定结果,形成模

拟分析样本数据. 计算样本数据的标准差作为 k 个站点下平均值法的标定精度评估值.

在单站点标定即 $k = 1$ 的情况下对应的组合数量为 $C_{10}^k = 10$, 上述评估方法仍然适用. 其中每个组合中仅包含该站点自身标定结果, 即以站点标定数据的标准差评估单站点均值法标定精度. 在站点数量为 9 与 10 的情况下, 由于获取的评估样本数据规模有限, 因此不予模拟.

不同站点数量下的均值标定法精度评估结果见图 6 与图 7, 为便于直观显示, 单位为 ".

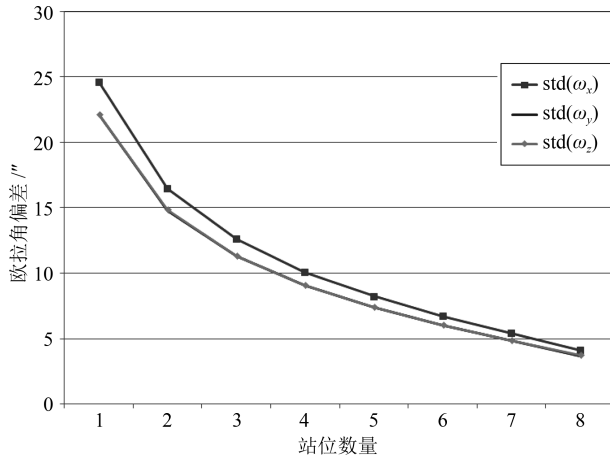


图 6 欧拉角偏差统计

Fig. 6 Deviation statistics of Euler angles

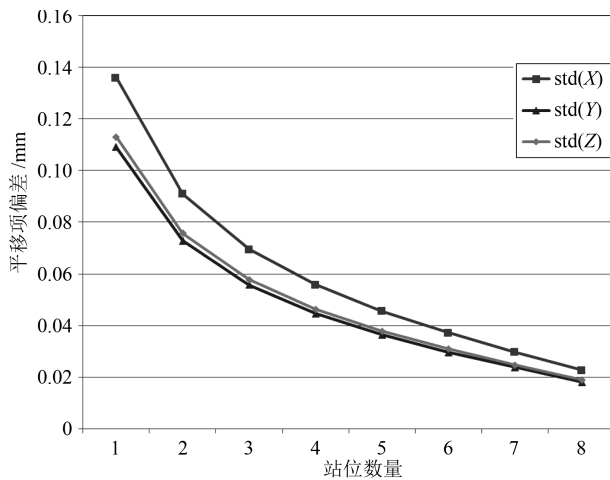


图 7 平移向量偏差统计

Fig. 7 Deviation statistics of translation vector

进一步采用整体平差优化方法, 对各站点下目标点的坐标观测值进行整体平差, 获取各站点下中介坐标转换关系 T_{tl}^k 、 T_{ts}^k 、 T_{bl}^k 及基坐标系标定结果 T_{sb}^k 的平差优化值, 结果表明式 (26) 中所列的条件方程成立. 显然, 一致性准则的采用消除了各站点下标定结果的差异, 进一步提高了标定精度. 最终的标定结果 $\tilde{T}_{sb}$ 取为 (2.475, 6.193, -1.415, -19.514,

-35.433, 279.327).

5.3 局部视角的全局标定与多视数据对齐

采用组合测量系统对某型飞机方向舵标准样件气动外形进行了测量. 飞机制造中对于不同形状特征的精度分配不同. 其中部件整体形状由大尺寸自由曲面气动外形覆盖, 此区域装配制造精度要求高. 同时分布的大量台阶与孔洞, 其制造精度要求一般. 测量过程中, 光学扫描仪从不同位置接近被测表面, 获取 66 个不同视角下的局部测量数据. 与此同时, 激光跟踪仪在 8 个站点下完成不同视角下扫描仪的动态位姿观测, 结合其对自身站点测量坐标系的观测, 进而利用第 4 节中的方法完成局部视角的全局标定并将测量数据统一转换至全局测量坐标系下, 结果见图 8.

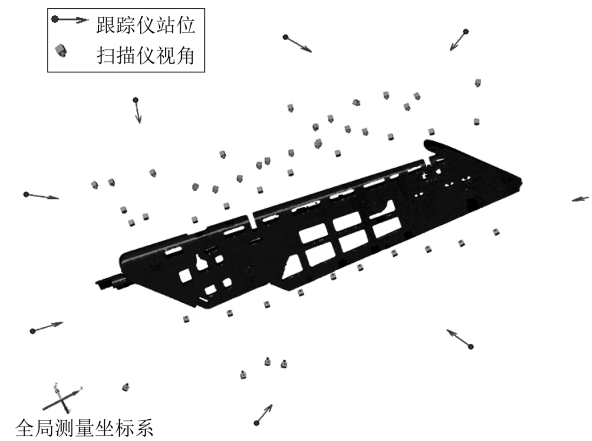


图 8 多视数据对齐效果

Fig. 8 Alignment of multi-views

为评估测量精度, 将点云数据与理论模型进行比较, 通过统计测量点到模型距离的偏差来评估测量综合不确定度. 该偏差指标是全测量过程不确定度的综合反映, 包含系统设备自身测量精度、操作人员与环境因素、局部视角全局标定与多视对齐精度以及 CAD 模型配准精度等. 偏差指标的统计结果见图 9, 结果表明 96.18% 的数据点偏差位于 ± 0.05 mm 之内, 其余区域发生于视线遮挡区域与加工精度要求不高的内部结构区域, 表明该样件的制造精度满足行业要求.

6 结论

1) 布设测量控制点以建立全局测量控制网, 通过控制网的多站点坐标观测以获取大量冗余观测数据, 采用控制网平差优化技术降低冗余数据间的内在矛盾可以显著提高全局测量控制点的定位精度.

2) 基于预设的全局控制点定义全局测量坐标系保证了测量基准空间定位的唯一性, 为全测量过程

提供了可靠的全局约束,并为实现测量数据与装配设计基准的几何关联提供了依据,以及为实现不同阶段测量工作间数据比较,进而为实现测量数据与CAD模型的比较检验及后续工程应用提供了便利。

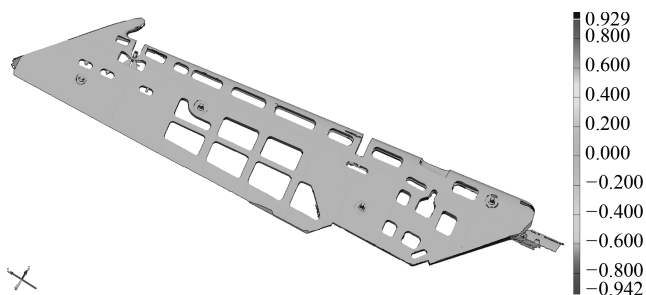


图9 测量数据与产品数模的对比分析

Fig.9 Comparison of the measurement data and the product digital model

3) 布设跟踪仪观测目标并据此建立扫描仪基坐标为扫描仪的动态位姿跟踪提供了观测基准。建立扫描仪坐标映射模型并采用测量平差优化方法可完成映射模型的高精度标定,而基于冗余标定数据一致性的条件方程的构建及其与平差优化模型的结合则进一步提高了标定精度。

4) 测量过程中采用激光跟踪仪完成扫描仪位姿的实时定位,结合跟踪仪对全局控制网的观测实现了局部视角测量数据的全局标定与数据融合,避免了额外标定设备的介入与标定操作的干扰,有效地提高了测量自动化与效率。

References

- 1 Mosqueira G, Apetz J, Santos K M, Villani E, Suterio R, Trabasso L G. Analysis of the indoor GPS system as feedback for the robotic alignment of fuselages using laser radar measurements as comparison. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, **28**(6): 700–709
- 2 Liu X L, Peng X, Chen H L, He D, Gao B Z. Strategy for automatic and complete three-dimensional optical digitization. *Optics Letters*, 2012, **37**(15): 3126–3128
- 3 Fu Y J, Wang Z G, Li B, Zhang J C. Three-dimensional shape measurement of complex surfaces based on defocusing and phase-shifting coding. *Journal of Modern Optics*, 2015, **62**(12): 1015–1026
- 4 Schöch A, Salvadori A, Germann I, Balemi S, Bach C, Ghiotti A, Carmignato S, Maurizio A L, Savio E. High-speed measurement of complex shaped parts at elevated temperature by laser triangulation. *International Journal of Automation Technology*, 2015, **9**(5): 558–566
- 5 Nakazawa T, Samara A. Three-dimensional inline inspection for substrate warpage and ball grid array coplanarity using stereo vision. *Applied Optical*, 2014, **53**(14): 3101–3109
- 6 Qi L, Zhang Y X, Wang S, Tang Z Q, Yang H, Zhang X P. Laser cutting of irregular shape object based on stereo vision laser galvanometric scanning system. *Optical and Lasers in Engineering*, 2015, **68**: 180–187

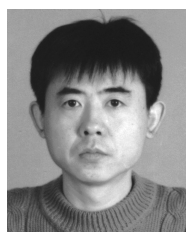
- 7 Ri S E, Muramatsu T, Saka M, Tanaka H. Fast and accurate shape measurement system utilizing the fringe projection method with a ferroelectric liquid-crystal-on-silicon microdisplay. *Optical Engineering*, 2012, **51**(8): 081506
- 8 Zhang F M, Qu X H. Fusion estimation of point sets from multiple stations of spherical coordinate instruments utilizing uncertainty estimation based on Monte Carlo. *Measurement Science Review*, 2012, **12**(2): 40–45
- 9 Muelaner J E, Cai B, Maropoulos P G. Large-volume metrology instrument selection and measurability analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2010, **224**(6): 853–868
- 10 Maropoulos P G, Guo Y, Jamshidi J, Cai B. Large volume metrology process models: a framework for integrating measurement with assembly planning. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, **57**(1): 477–480
- 11 Gosavi A, Cudney E. Form errors in precision metrology: a survey of measurement techniques. *Quality Engineering*, 2012, **24**(3): 369–380
- 12 Galetto M, Mastrogiacomo L, Pralio B. MScMS-II: an innovative IR-based indoor coordinate measuring system for large-scale metrology applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, **52**(1–4): 291–302
- 13 Zhan Dong, Yu Long, Xiao Jian, Chen Tang-Long. Study on multi-cameras and structured-light vision system calibration approach study in large filed view measurement. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, **36**(4): 903–912 (占栋, 于龙, 肖建, 陈唐龙. 多摄像机结构光大视场测量中全局标定方法研究. *仪器仪表学报*, 2015, **36**(4): 903–912)



孟 飙 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点实验室副教授。2015 年获北京航空航天大学博士学位。主要研究方向为先进飞机制造工艺。

E-mail: biao.m@aliyun.com

(**MENG Biao** Associate professor at the Key Defense Laboratory of Aviation Manufacturing Process Digital, Shenyang Aerospace University. He received his Ph. D. degree from Beihang University in 2015. His main research interest is advanced aircraft manufacture process.)



曲学军 沈阳航空航天大学航空航天工程学部副教授。2014 年获北京航空航天大学博士学位。主要研究方向为飞机数字化装配, 数字化测量与数据分析。本文通信作者。

E-mail: quxuejunjiang@sohu.com

(**QU Xue-Jun** Associate professor at the Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University. He received his Ph. D. degree from Beihang University in 2014. His research interest covers aircraft digital assembly, digital measurement and data analysis. Corresponding author of this paper.)