

文章编号 1004-924X(2016)06-1319-09

参数相关随机信息约束下的地面 脉冲激光扫描仪自校准

郭献涛*, 黄 腾, 沈月千

(河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:针对地面脉冲激光扫描仪自校准参数中存在的高相关性问题的,基于全站仪误差模型提出了一种脉冲激光扫描仪自校准统一方法。该方法初始假设激光扫描仪的校准参数与全站仪的系统误差相似,通过引入估计参数的相关随机信息以及选择合适的网络配置,实现了降低参数相关性和提高参数估计可靠性的目的。通过平差方法对估计参数赋予权重信息,把所有参数都视为最小二乘平差中的观测值,权重越高参数相关性期望越低。最后,采用该方法对脉冲激光扫描仪 Leica scan station 实施了自校准。实验结果表明,该方法能够高精度估计大多数参数且实现了参数间的低相关性,有利于随机内部约束平差的使用;重大的系统误差是激光测距仪零误差和竖盘指标差,其中为了得到零误差的可靠估计,须以约 1 mm 的精度确定扫描仪的位置。

关键词:三维测量;地面脉冲激光扫描仪;自校准;误差模型;相关性

中图分类号:P232 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162406.1319

Self-calibration of terrestrial laser scanner based on stochastic inner constraint information of estimated parameters

GUO Xian-tao*, HUANG Teng, SHENG Yue-qian

(School of Earth Sciences and Engineering of Hohai University, Nanjing 211100, China)

* Corresponding author, E-mail: xiantaoguo@gmail.com

Abstract: In terms of high correlation in self-calibration of ground pulse laser scanner, a unified method for self-calibration of pulse laser scanner has been put forward based on the error model of the total station. In this method, it is originally assumed that the calibration parameter of the laser scanner is similar to the system error of the total station, and the objective of reducing the parameter correlation and improving the reliability of parameter estimation is attained by means of introducing relevant randomized information of the estimation parameter and selecting appropriate network configuration. Through the adjustment method, the estimation parameter is endowed with weight information. By regarding each parameter as the observed value in the least squares adjustment, the higher the weight is, the lower the parameter correlation will be. Finally, self-calibration of Leica scan station of the pulse laser scanner is carried out through this method. It is showed in this test that this method can help to achieve high-precision parameter estimation and realize low parameter correlation, which

收稿日期:2015-11-18;修订日期:2016-01-20.

基金项目:江苏省研究生培养创新工程基金资助项目(No. CX22_130264);江苏省测绘科研项目(No. JSCHKY201301)

makes for the application of randomized constraint adjustment. Major system error is the zero error of laser range finder and the index error of vertical circle, and to achieve a reliable estimation of the zero error, location of the scanner should be confirmed with a precision of about 1 mm.

Key words: 3D measurement; Terrestrial Laser Scanner(TLS); self-calibration; error model; correlation

1 引言

近年来,随着工程测量技术的快速发展,空间数据采集技术显示出巨大进步。其中,地面激光扫描仪(Terrestrial Laser Scanner, TLS)能够实现 3D 数据的直接、自动获取,但与其它测量技术一样,其测量精度很大程度上也受制于仪器的系统误差^[1],因此使用前需要对 TLS 仪器实施校准。TLS 仪器的校准通常分为两组^[2]:(1)组件校准,即对仪器组件(激光测距仪和角度测量系统)分别实施校准。该类校准要精确知道扫描仪的误差模型。然而,受扫描仪构造的复杂性及专利隐私的限制,这方面的知识通常很有限。此外,组件校准还需要特殊的校准设施,如校准基线,因此该方法不具有普适性。(2)系统校准,可通过自校准实施系统校准。与组件校准不同,在系统校准中,扫描仪误差模型的先验知识并不重要。相反,误差模型由最小二乘平差校准导出。因此,用户无需知道误差源即可进行仪器误差的估计,而建立 TLS 校准场也不是复杂问题^[3]。

目前,自校准已成为激光扫描仪检校的流行方法,并已在摄影测量中应用了几十年,它可以确定特定传感器的所有系统误差及其它系统参数^[4]。根据该技术在 TLS 中的应用报道,激光扫描仪的自校准可以分为基于点的自校准和基于平面的自校准两类。基于点的自校准是对基于可提取中心坐标的点目标物实施校准。2010 年, Lichti 使用该方法对扫描仪 FARO 880 实施校准并分析了校准参数的时序行为^[5]。2011 年, Soudarissanane 等利用扫描强度数据,基于全景相机传感器扩展模型对扫描仪 Imager 5003 实施了校准^[6]。基于平面的自校准是对基于平面目标物返回的激光坐标实施了校准。2005 年, Rietdorf 首次使用该方法对激光扫描仪 PoMeS 以及 Imager

5003 实施了校准^[7]。2011 年, Lichti 基于该方法对扫描仪 FARO 880 实施了校准^[8],其平差残差模式明显不同于点校准法,系统误差识别更加复杂。关于该方法的其它应用可以参考文献^[9-10]。

上述研究都专注于相位差扫描仪,而脉冲激光扫描仪的系统误差研究却相对较少。此外, TLS 自校准时需要采取一些措施来阻止估计参数间的高相关性导致的不确定性。本文基于点自校准方法提出了一种 TLS 自校准统一的方法。该方法基于全站仪误差模型,通过引入估计参数的相关随机信息以及选择合适的网络配置,实现了降低参数相关性,提高参数估计可靠性的目的。

2 TLS 自校准理论

为实施 TLS 自校准,首先需关注两个重要问题:传感器建模与网络设计。

2.1 传感器建模

传感器建模是扫描仪校准中最重要的问题之一^[11]。由于专利原因,用户对激光扫描仪内部运作的了解通常非常有限,所以不得不对 TLS 的误差模型做出假设。激光扫描仪类似于无反射棱镜的全站仪,因此大多数研究人员选择全站仪误差模型作为 TLS 自校准的基础。

该模型重要的校准参数(Calibration Parameters, CPs)通常包括:激光测距仪零误差和尺度误差、视准轴误差和水平轴误差以及竖盘指标差。这些参数都具有明确的物理解释,所以称为物理 CPs。在利用这些 CPs 实施自校准平差后,观测残差中还可能会存在一些系统趋势。分析这些趋势将有助于确定额外的 CPs,而这些 CPs 不依赖于误差模型,因此称之为实证 CPs。

2.2 网络设计

以自校准为目的的 TLS 网络设计应为 CPs 的最优估计。事实上,自校准是传感器误差模型

建立的本质部分^[12],因此,TLS自校准的最优网络配置应能提供CPs的可靠估计,且与其它系统参数保持较低的相关性。

2.2.1 基准设计

类似于相机自校准,可通过内部约束或最小化约束定义网络基准。最常见的基准是对对象点坐标(Objective Points,OPs)实施内部约束,该约束得到的参数精度较好,但会增加系统参数间(主要是CPs与外方位参数(EOPs)间)的相关性。

常见的最小化约束是固定3个非共线点的坐标,或固定扫描仪测站的位置和方位。在相机自校准中,最小化约束易导致OPs和一些CPs间的高相关性。同样,内部约束和最小化约束中存在的问题也可能会出现于TLS自校准中。因此,它们并不是TLS仪器自校准网络基准的最优选择。

2.2.2 配置设计

基于前人实施TLS校准的经验,就实现CPs的高精度和低相关性估计,本文的网络配置如下:

(1)对垂直角依赖误差(如视准轴误差和水平轴误差)的估计,目标物在垂直维度上应分布良好;(2)至少应有两个扫描仪位置用于测距仪零误差的确定;(3)使用大量的目标物提供高冗余度,以确保非模型系统误差导致的残差系统趋势。

2.2.3 参数相关性

自校准参数相关性分析是评估平差质量的重要方式^[13]。高相关性说明了平差系统的不稳定性。在TLS自校准中,应降低CPs内部及其与其它系统参数间的相关性。参数相关性主要由以下方面导致:(1)较弱的网络几何;(2)使用的约束类型;(3)过度参数化。

为了查看哪些参数显著相关,在实施自校准之前,可基于模拟数据实施相关分析,以调整网络配置,甚至改变基准。

3 自校准方法

3.1 概念

传统上,最小二乘平差中一些变量被视为观测值,其余的视为参数。而本文提出方法的数学模型通过分配相关的先验权重把所有变量都视为

观测值,其优势是易于引入估计参数(主要是EOPs)的相关随机信息。因此,该方法并没有施加明确的约束(易导致高相关性),而是基于有效的随机信息对所有参数分配权重,通过“随机约束”定义基准。

3.2 数学模型

假设在室内校准场中基于点目标物对一个扫描仪实施校准。为简单起见,假设每个扫描站仅实施一次扫描,且每站上所有目标物均可见。其底层数学模型为扫描仪坐标系统与外部坐标系统间的刚体变换。从第*i*个测站扫描第*j*个目标物的条件方程为:

$$\Delta \mathbf{X}^{(i)} + \mathbf{R}^{(i)} \mathbf{x}_{\text{scan } j}^{(i)} - \mathbf{X}_j^e = 0, \quad i=1, 2, \dots, p, \\ j=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

其中:*p*为扫描站数;*m*为校准场中点目标物的数量; $\Delta \mathbf{X}^{(i)}$ 是平移参数($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)向量; $\mathbf{R}^{(i)}$ 是两个坐标系统间的旋转矩阵,为三个旋转角(ω, ϕ, κ)的函数; \mathbf{X}_j^e 为第*j*个目标物在外部坐标系统中的坐标向量; $\mathbf{x}_{\text{scan } j}^{(i)}$ 是第*j*个目标物在扫描仪坐标系统中改正扫描仪CPs影响后的坐标向量。参数 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \omega, \phi$ 和 κ 为扫描仪的EOPs。

向量 $\mathbf{x}_{\text{scan } j}^{(i)}$ 可表示为:

$$\mathbf{x}_{\text{scan } j}^{(i)} = \begin{bmatrix} x_j^{(i)} \\ y_j^{(i)} \\ z_j^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_j^{(i)} - \Delta r) \cos(\varphi_j^{(i)} - \Delta\varphi) \cos(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \\ (r_j^{(i)} - \Delta r) \sin(\varphi_j^{(i)} - \Delta\varphi) \cos(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \\ (r_j^{(i)} - \Delta r) \sin(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \end{bmatrix}, \\ i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

其中:*r*, φ 和 θ 分别表示斜距,水平方向和垂直角。在自校准开始,误差项 $\Delta r, \Delta\varphi$ 和 $\Delta\theta$ 建模为:

$$\Delta r = a_0, \Delta\varphi = b_1 / \cos \theta_j^{(i)} + b_2 \tan \theta_j^{(i)}, \Delta\theta = c_0,$$

其中: a_0, b_1, b_2 和 c_0 分别表示激光测距仪的零误差、视准轴误差、水平轴误差以及竖盘指标差。由于自校准通常在相对较小的空间中实施,尺度参数估计较小,所以没有把该误差包含到模型中。

由于式(1)中的观测值和参数隐性相关,所以使用线性化混合平差模型。线性条件如下:

$$\mathbf{B} \mathbf{V} + \mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{W}, \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_x - \mathbf{X} = \mathbf{X}^0 - \mathbf{X}^{\text{obs}} = \mathbf{W}_x, \quad (4)$$

其中: $r=3 \text{ pm}$; $n=3 \text{ pm}$; $u=6 \text{ p} + u_{\text{CP}} + 3 \text{ m}$; \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 分别是式(1)关于参数和扫描仪观测的衍生矩阵;

W 和 W_x 为闭合差向量, X 是参数向量, 其近似值为向量 X^0 ; X^{obs} 为参数“观测”值; V_x 是与“观测”参数有关的残差向量; u_{CP} 表示 CPs 的数量。这里 X 为参数近似值的修正, 联立式(3)和式(4)可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{A}_{\text{EOP}} & \mathbf{A}_{\text{CP}} & \mathbf{A}_{\text{OP}} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{V}_{\text{EOP}} \\ \mathbf{V}_{\text{CP}} \\ \mathbf{V}_{\text{OP}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} & & \\ & \mathbf{I} & \\ & & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{\text{EOP}} \\ \mathbf{X}_{\text{CP}} \\ \mathbf{X}_{\text{OP}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{W}_{\text{EOP}} \\ \mathbf{W}_{\text{CP}} \\ \mathbf{W}_{\text{OP}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在式(5)中, 矩阵 A 以及每个向量 X, W_x 和 V_x 都被分解成三部分, 对应于每个测站的 EOPs ($A_{\text{EOP}}; X_{\text{EOP}}; W_{\text{EOP}}; V_{\text{EOP}}$), 扫描仪 CPs ($A_{\text{CP}}; X_{\text{CP}}; W_{\text{CP}}; V_{\text{CP}}$) 和 OPs ($A_{\text{OP}}; X_{\text{OP}}; W_{\text{OP}}; V_{\text{OP}}$)。

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{EOP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}_{\text{EOP}} + \mathbf{P}_{\text{EOP}} & \mathbf{A}_{\text{EOP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}_{\text{CP}} & \mathbf{A}_{\text{EOP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}_{\text{OP}} \\ \mathbf{A}_{\text{CP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}_{\text{EOP}} & \mathbf{A}_{\text{CP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}_{\text{CP}} + \mathbf{P}_{\text{CP}} & \mathbf{A}_{\text{CP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}_{\text{OP}} \\ \mathbf{A}_{\text{OP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}_{\text{EOP}} & \mathbf{A}_{\text{OP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}_{\text{CP}} & \mathbf{A}_{\text{OP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}_{\text{OP}} + \mathbf{P}_{\text{OP}} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{EOP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{W} - \mathbf{P}_{\text{EOP}} \mathbf{W}_{\text{EOP}} \\ \mathbf{A}_{\text{CP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{W} - \mathbf{P}_{\text{CP}} \mathbf{W}_{\text{CP}} \\ \mathbf{A}_{\text{OP}}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{W} - \mathbf{P}_{\text{OP}} \mathbf{W}_{\text{OP}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中:

$$\mathbf{M} = \mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T, \quad (11)$$

解变为:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{U}. \quad (12)$$

为了消除设计矩阵的基准缺陷, 对这些坐标实施随机内部约束, 以替代 OPs 作为观测值。在该方法中, 随机内部约束如下:

$$\mathbf{V}_c + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbf{D} \\ 6 \times 1 & & 6 \times 3m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{\text{EOP}} \\ \mathbf{X}_{\text{CP}} \\ \mathbf{X}_{\text{OP}} \end{bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (13)$$

其中: V_c 是与约束有关的残差向量, D 是标准形式的内部约束矩阵。需指出的是, 这里估计的不是 OPs, 而是它们近似值的修正值(表示为 X_{OP})。

通过下式计算平差的先验 VCV 矩阵:

$$\mathbf{C} = \text{blkdiag}(\mathbf{C}_{\text{obs}} \quad \mathbf{C}_{\text{EOP}} \quad \mathbf{C}_{\text{CP}} \quad \mathbf{C}_{\text{OP}}) = \text{blkdiag}(\mathbf{Q}_{\text{obs}} \quad \mathbf{Q}_{\text{EOP}} \quad \mathbf{Q}_{\text{CP}} \quad \mathbf{Q}_{\text{OP}}) = \text{blkdiag}(\mathbf{P}_{\text{obs}}^{-1} \quad \mathbf{P}_{\text{EOP}}^{-1} \quad \mathbf{P}_{\text{CP}}^{-1} \quad \mathbf{P}_{\text{OP}}^{-1}) = \mathbf{P}^{-1}, \quad (6)$$

其中: C, Q 和 P 分别为方差协方差矩阵, 辅因子矩阵和权矩阵, “blkdiag”表示块对角矩阵, 下标“obs”表示扫描仪观测值。在最小二乘平差开始时, 先假定先验方差因子 $\sigma^2 = 1.0$ 。假设式(6)中所有系统参数不相关。VCV 的子矩阵 C_{obs} 为:

$$\mathbf{C}_{\text{obs}} = \text{blkdiag}(\sigma_r^2 \mathbf{I}_{6p \times 6p}, (\sigma_\varphi^2 + \sigma_{\text{beam}}^2) \mathbf{I}_{pm \times pm}, (\sigma_\theta^2 + \sigma_{\text{beam}}^2) \mathbf{I}_{pm \times pm}), \quad (7)$$

其中: $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_\theta$ 分别为斜距、水平方向和垂直角的先验标准差, 可从仪器说明书中获得; σ_{beam} 为物体表面上激光束光斑内距离测量位置的不确定性, 其值等于 1/4 波束宽度。

X 的法方程系统为:

$$\mathbf{N} \mathbf{X} = \mathbf{U}, \quad (8)$$

其中:

将式(5)变为如下矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{A}_{\text{EOP}} & \mathbf{A}_{\text{CP}} & \mathbf{A}_{\text{OP}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{V}_c \\ \mathbf{V}_{\text{EOP}} \\ \mathbf{V}_{\text{CP}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} & & \\ & \mathbf{I} & \\ & & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{\text{EOP}} \\ \mathbf{X}_{\text{CP}} \\ \mathbf{X}_{\text{OP}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{W}_{\text{EOP}} \\ \mathbf{W}_{\text{CP}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

这时平差的先验 VCV 矩阵为:

$$\tilde{\mathbf{C}} = \text{blkdiag}(\mathbf{C} \quad \mathbf{C}_c \quad \mathbf{C}_{\text{EOP}} \quad \mathbf{C}_{\text{CP}}) = \text{blkdiag}(\mathbf{Q} \quad \mathbf{Q}_c \quad \mathbf{Q}_{\text{EOP}} \quad \mathbf{Q}_{\text{CP}}) = \text{blkdiag}(\mathbf{P}^{-1} \quad \mathbf{P}_c^{-1} \quad \mathbf{P}_{\text{EOP}}^{-1} \quad \mathbf{P}_{\text{CP}}^{-1}) = \tilde{\mathbf{P}}^{-1}, \quad (15)$$

其中: C_c, Q_c 和 P_c 分别是带有约束的“观测”的方

差协方差矩阵,辅因子矩阵和权矩阵。在自校准中,矩阵 C_C 和 Q_C 可以设为单位矩阵乘以一个非常小的数,矩阵 P_C 的对角元素将接近无穷大。利用式(12)可以找到内部约束平差的解。

为了在自校准平差中探测粗差,选择 Forstner 法联合稳健估计与方差分量估计,并利用改进的 Danish 法进行参数估计^[14]。首先,用上述计算的 VCV 矩阵实施最小二乘平差。然后,基于平差残差带权计算新的权矩阵。每次迭代后重新赋权,降低异常观测值的权重,直至收敛。在计算该稳健估计后,用 Forstner 法估计扫描观测量的方差因子。最后,实施 F 测试以确定方差因子与其先验值是否差异显著,若无重大差异,则接受自校准结果;若差异显著,则用估计的方差因子计算新的权矩阵,重复整个流程。

4 实验

4.1 扫描仪

利用上述方法对一个脉冲激光扫描仪 Leica Scan Station 实施校准,该扫描仪的水平视场为 360° ,垂直视场为 270° 。在测程为 50 m 时,距离的测量精度为 4 mm,水平方向和垂直方向的角精度均为 0.0034° 。同时,该扫描仪安装了光学对点器和双轴补偿器,既可测量仪器的高度,也可通过高分辨率扫描已知坐标的目标物实施定向,可实现点云的直接配准。

4.2 校准场

校准实验在一个大厅($30\text{ m} \times 10\text{ m}$)里实施,其平面图如图 1 所示。由于天花板较高,所以没有在上面布置目标物,目标物垂直分布受到限制,实验中垂直角为 $-39^\circ \sim 48^\circ$ 。由于大厅尺寸较大,可以获得较好的测距变化(可达 30 m),因此非常适于激光扫描仪自校准。而目前已知的自校准实验大都在相对较小的房间里进行,最大测距约为 10 m。

校准场中有 89 个固定于墙和地板上的高清打印黑白目标物,均匀且有深度地分布于整个校准场空间。为找到降低 CPs 和其它系统参数间相关性的网络几何,在实际测量前实施自校准模拟。由模拟结果可知,4 站网络配置适用于该校准实验。利用 TM30 实施测量,确定 4 个扫描站(见图 1)和 8 个目标物的坐标,用于直接配准。

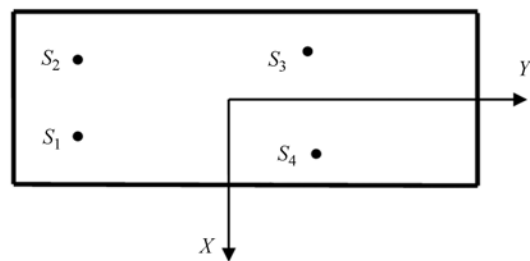


图 1 校准场平面图,黑色圆圈表示扫描站位置,XY 为所使用的外部 CS 的轴线

Fig. 1 Planimetric map of self-calibration field. Black points represent positions of scanning station, and XY are axes of external CS

在平差软件中估计了测站和目标物坐标,它们在水平面和高程上的标准差均低于 1 mm。

4.3 地面激光扫描

从不同高度(1.2~1.5 m)的 4 个扫描站实施正交扫描,每站到后视目标物的距离应尽量远,获取的点云将被直接配准。在扫描前测定温度和气压。

在每站上,首先用内置的数码相机获取整个校准场的图像,然后以几分米的点间隔粗扫描校准场,接着精扫描每个目标物。粗扫描的目的是快速获取校准场的几何信息,以找到精扫描的位置。最后,在 Cyclone 中以一个半自动程序确定目标物的中心坐标,并导出到文件中。由于部分入射角较大及精扫描中丢失了一些目标物,最终,只有 79 个目标物用于自校准实验。

4.4 随机模型

在 MATLAB 中处理校准场中的测量数据,实施带有和不带有随机内部约束的自校准平差,以研究不同基准定义方法对参数相关性的影响。

从扫描仪的说明书可知,距离观测及整平的标准差分别为 4 mm 和 $1.5''$ 。水平方向和垂直角的标准差均为 0.0045° 。扫描仪中心坐标的标准差为:

$$C_{\text{scanner}}^{(i)} = C_0 + C_H, \quad i=1,2,3,4, \quad (16)$$

其中: C_0 为扫描仪对中的第 i 站点坐标的 VCV 矩阵, C_H 是相对于站点的扫描仪中心位置的 VCV 矩阵。矩阵 C_0 由全站仪测量平差的站点坐标方差组成。矩阵 C_H 建模如下:

$$C_H = \text{diag}[(\sigma_{\text{centr}} \cdot HI)^2, (\sigma_{\text{centr}} \cdot HI)^2, \sigma_H^2], \quad (17)$$

其中： σ_{centr} 为光学对点器的对中精度， HI 为仪器的高度， σ_H 为仪器精度。在这里假设 $\sigma_{\text{centr}} = 0.5$ mm/m， $\sigma_H = 1$ mm。扫描仪中心坐标在每个方向的最大标准差约为 1 mm。

设置扫描仪方位的先验标准差。虽然通过扫描已知坐标目标物确定了先验标准差，其初始值的质量较好，但该方位并不是独立观测值，受水平方向 CPs 的影响，不能仅通过水平方向观测、扫描仪平面坐标及后视上的随机误差传播进行计算。标准差设置为 2° ，以在平差中控制该方位，该设置并不会导致结果出现较大变化。

设置 Ops 的权重，其参数近似值来自校准场中的精扫描，由于精扫描得到的目标物坐标精度较高，为避免赋予的权重过大，以 10 cm 作为 Ops 的先验标准差。在平差中不固定任何已知点坐标。然而，在扫描仪的整平精度不高时，就须要固定一些已知点以稳定平差。最后，基于前人研究成果，在 CPs 的先验标准差中，设置零误差为 10 cm，角度误差为 0.1° ，这些参数的权重都较小，在平差中几乎“自由”，且较小的权重并不会导致结果产生较大差异。

在内部约束平差中，扫描仪坐标的先验标准差设为 10 m，方位标准差设为 90° ，以在平差中完全控制这些参数。带有约束的观测量的 VCV 矩阵是一个 10^{-10} 的单位矩阵。扫描仪观测、整平和 CPs 的先验标准差全部与上述相同。

5 结果与分析

5.1 随机约束平差

由 4 个“全站仪”CPs 实施的初始平差结果可知，视准轴误差与扫描仪的方位高度相关（相关系数为 -0.95 ），原因是目标物在垂直维上的有限分布。因此，设置初始平差为零并分配一个标准差为 10^{-5} ，从 CPs 的初始设置中忽略该误差，所有进一步平差都只用 3 个“全站仪”CPs 实施。第一次平差在 10 次迭代后收敛，发现一个异常值，所有这 3 个扫描仪观测量的后验方差因子都与 1.0 相差较大。因此，用更新后的 VCV 矩阵实施新的平差，在迭代 14 次后收敛，发现 10 个异常值（其中 9 个是入射角较大的目标物观测值），其后验方差因子与 1.0 相差不大，接受其为最终结果，如表 1 所示。使用 t 测试，以 95% 置信水平估计 CPs 的可信度。

CPs 和其它系统参数间的相关性相对较低。已知扫描仪的中心位置对 a_0 和 ΔX 间的低相关性贡献巨大。由于 y 轴方向为大厅长尺寸方向， a_0 和 ΔX 间的相关性要大大低于 a_0 和 ΔY 间的相关性。扫描仪观测的后验标准差见仪器说明书：斜距为 2.1 mm，水平角和垂直角分别为 0.0025° 和 0.0034° 。扫描仪位置的平均标准差（ ΔX 、 ΔY 和 ΔZ ）低于 0.5 mm，旋转角的平均标准差： ω 和 φ 均为 0.0003° ， κ 为 0.0024° 。Ops 的平均标准差均低于 0.7 mm。

表 1 随机约束自校准平差结果

Tab. 1 Results from stochastic constraints self-calibrating adjustment

CPs	Value	σ	Significant?	Correlation coefficients		
				CP-EOP (max abs. value)	CP-OP	
					a_0	b_2
a_0/mm	-0.500 0	0.200 0	Yes			
$b_2/(\circ)$	0.001 2	0.001 3	No	$a_0/\Delta Y: 0.32$	-0.28—0.37	-0.24—-0.33
$c_0/(\circ)$	-0.006 2	0.000 5	Yes	$c_0/\Delta\omega: 0.24$		-0.24—0.09

图 2~图 4 给出了自校准残差平面图，表明不存在剩余的系统趋势。分析残差图可知，该扫描仪中重大的 CPs 是零误差和竖盘指标差。尽

管这些误差比较小，但它们仍然存在且能在自检校中被精确估计。根据自校准的结果，可以说该扫描仪已在出厂前进行较好的校准。虽然视准

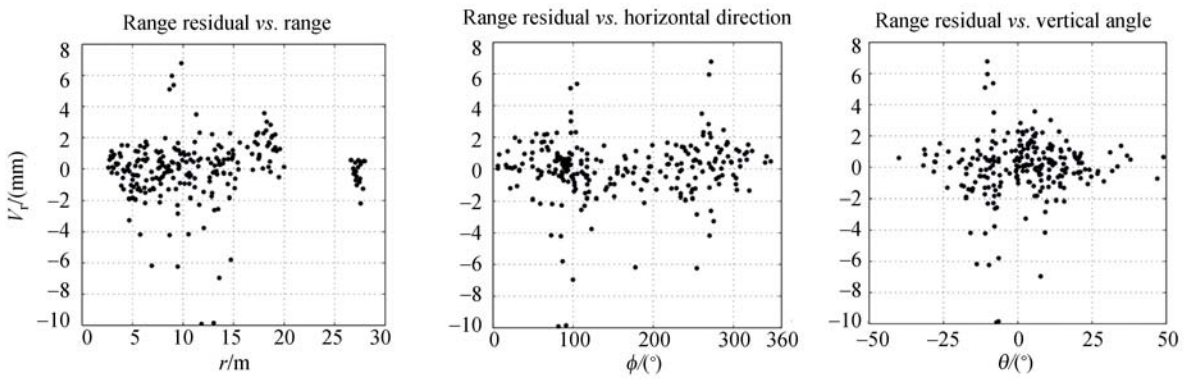


图 2 自校准后的距离残差

Fig. 2 Range residuals after self-calibration

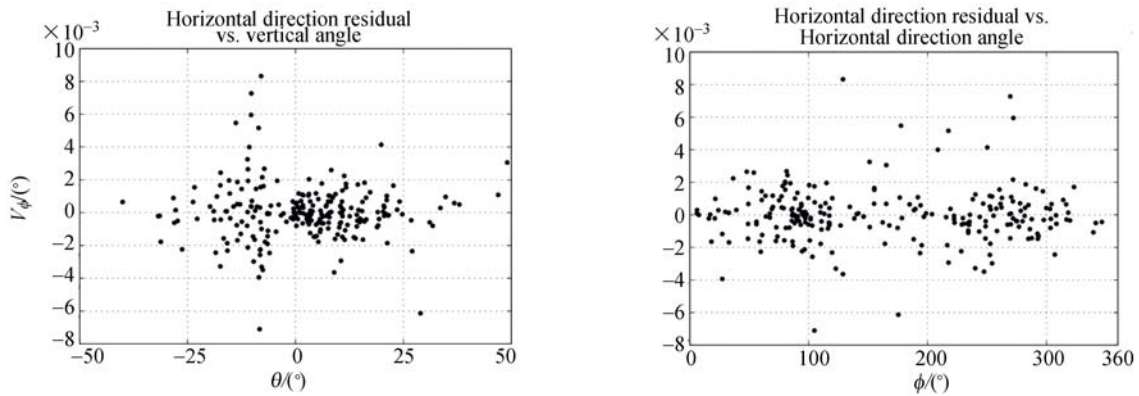


图 3 自校准后的水平方向残差

Fig. 3 Horizontal direction residuals after self-calibration

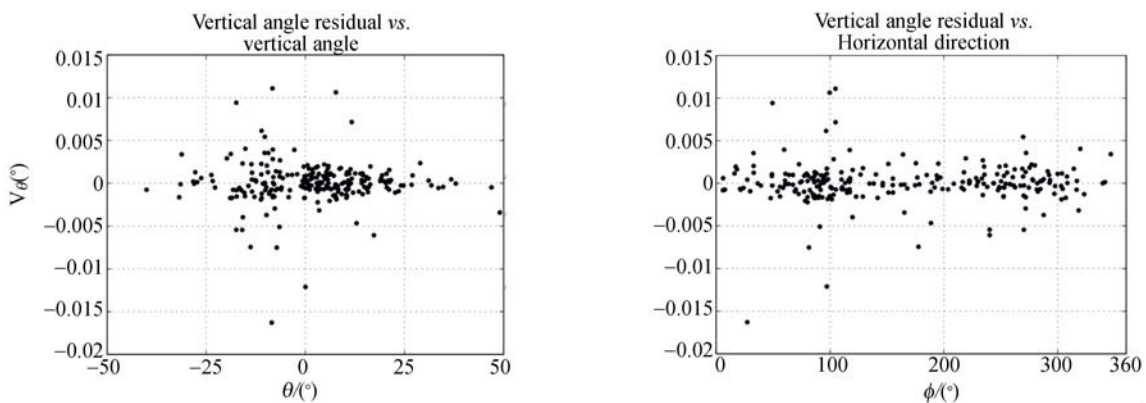


图 4 自校准后的垂直角残差

Fig. 4 Vertical angle residuals after self-calibration

轴误差的估计失败,但在校准场具有较好的目标物垂直分布情况下,其估计也是可能的。

由于自校准实验中的扫描为直接配准,所以消除了设计矩阵的基准缺陷,可以通过分配较大的权重来“固定”扫描仪的 EOPs。若扫描仪固定

于三脚架上并对中已知点,可以以约为 1 mm 的精度确定其位置坐标。由于扫描仪 EOPs 的权重较大,扫描中三脚架允许稍微移动,因此,在该情况下固定扫描仪的位置是不合理的,因为它可能偏离 CPs 的估计。另一方面,若将扫描仪放置于

强制对中桩上,扫描仪的位置精度可高达几十分之一毫米,这比测距仪精度高一个数量级。在这种情况下,可以在平差中固定扫描仪位置。然而,在实践中该方法是不可行的,因为其要求建立对中桩,这降低了它的灵活性。类似情况也适用于旋转 EOPs。至于扫描仪方位的确定(通过独立方法),其精度很大程度上取决于到后视目标物的距离。

5.2 随机内部约束平差

实施无视准轴误差估计参与的随机内部约束平差。第一次平差在 12 次迭代后收敛,发现一个异常值,没有方差因子通过 F 检验。第二次平差也在 12 次迭代后收敛,发现 8 个异常值。其中的 7 个异常值与第二次“随机约束”平差后的相同,所有方差因子通过 F 检验,被接受为最终结果,

如表 2 所示。

根据摄影测量自校准原理(见 2.2.1 节),随机内部约束导致 CPs 和 EOPs 间的相关性增加。此外,CPs 和 Ops 间的相关性也显著增长。同时,虽然 a_0 和 c_0 的估计相比于此前的情况发生了变化,但 c_0 仍然较大,这是参数和扫描仪坐标间高相关性的结果。上述事实证实了在 TLS 自校准中使用“随机约束”的优势,其残差图几乎与图 2~图 4 相同。扫描仪观测的后验标准差:测距为 2.0 mm,水平方向和垂直角分别为 0.0025° 和 0.0035° 。扫描仪位置的平均标准差小于 0.2 mm,旋转角度 ω 和 ϕ 的平均标准差为 0.0003° , κ 为 0.0005° 。Ops 的平均标准差都不超过 0.5 mm,这相对此前的情况有所改善。

表 2 带有随机内部约束的自校准平差结果

Tab. 2 Results from self-calibrating adjustment with stochastic inner constraints

CPs	Value	σ	Significant?	Correlation coefficients			
				CP-EOP (max abs. value)	CP-OP		
					a_0	b_2	c_0
a_0/mm	-0.2	0.2	No	$a_0/\Delta X:0.48$			
$b_2/(\circ)$	0.001 0	0.001 6	No	$a_0/\Delta Y:0.78$	-0.47—0.69	-0.42—0.49	-0.14—0.32
$c_0/(\circ)$	-0.005 0	0.000 5	Yes	$b_2/\Delta Y:0.48$			
				$b_2/\Delta \kappa:0.47$			
				$c_0/\Delta Z:0.73$			
				$c_0/\Delta \omega:0.34$			

6 结 论

为了有效降低地面激光扫描仪自校准中存在的参数高相关性,本文基于全站仪误差模型提出了一种地面激光扫描仪自校准的统一方法。该方法通过引入估计参数的相关随机信息,降低了参数相关性(尤其是测距仪的零误差与扫描仪中心

水平坐标间的相关性),提高了参数估计的可靠性。实验结果表明,该方法适用于扫描仪系统的误差校准。由于实验环境所限,目标物在垂直维上分布不均,导致无法可靠估计视准误差。然而,对于具有近似球形视场的扫描仪,可以克服该问题。此外,为了得到零误差的可靠估计,必须以约 1 mm 的精度确定扫描仪的位置。

参考文献:

- [1] LICHTI D D. A review of geometric models and self-calibration methods for terrestrial laser scanner[J]. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 2010, 16(1): 3-19.
- [2] CHOW J, LICHTI D, GLENNIE C. Point-based versus plane-based self-calibration of static terrestrial laser scanners[J]. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 2011, 38: 121-126.
- [3] 官云兰,程效军,詹新武,等.地面三维激光扫描仪系统误差标定[J]. *测绘学报*, 2014, 43(7):731-738. GUAN Y L, CHENG X J, ZHAN X W, et al.. Research on systematic errors calibration of terrestrial laser scanner[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(7):731-738. (in Chinese)
- [4] 郭天太,王晓晓,洪博,等.用于影像仪测量误差

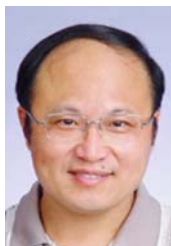
- 分离的自校准技术[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 197-205.
- GUO T T, WANG X X, HONG B, *et al.*. Self-calibration technology in measuring error separation imaging instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 197-205. (in Chinese)
- [5] LICHTI D D. Terrestrial laser scanner self-calibration: correlation sources and their mitigation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65 (1): 93-102.
- [6] SOUDARISSANANE S, LINDENBERGH R, MENENTI M, *et al.*. Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(4): 389-399.
- [7] RIETDORF A. *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip* [M]. Verlag der Bayer. Akad. Der Wiss., 2005: 177-179.
- [8] LICHTI D, CHOW J, LAHAMY H. Parameter de-correlation and model-identification in hybrid-style terrestrial laser scanner self-calibration [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(3): 317-326.
- [9] MOLNÁR G, PFEIFER N, RESSL C, *et al.*. Range calibration of terrestrial laser scanners with piecewise linear functions [J]. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2013(1): 9-21.
- [10] CHOW J, EBELING A, TESKEY B. Low cost artificial planar target measurement techniques for terrestrial laser scanning [C]. *FIG Congress*, 2014: 11-16.
- [11] 周森, 郭永彩, 高潮, 等. 基于三维激光扫描的移动大尺寸圆柱体工件长度快速检测系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1524-1530.
- ZHOU S, GUO Y C, GAO CH, *et al.*. Rapid length measuring system for mobile and large scale cylinder workpieces based on 3D laser scanning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1524-1530. (in Chinese)
- [12] 劳达宝, 杨学友, 郝继贵, 等. 扫描平面激光坐标测量系统校准方法的优化 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 872-877.
- LAO D B, YANG X Y, ZHU J G, *et al.*. Optimization of calibration method for scanning planar laser coordinate measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 872-877. (in Chinese)
- [13] 杨必胜, 董震, 魏征. 从车载激光扫描数据中提取复杂建筑物立面的方法 [J]. 测绘学报, 2013, 42(3): 11-17.
- YANG B SH, DONG ZH, WEI ZH. Extracting complex building facades from mobile laser scanning data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(3): 11-17. (in Chinese)
- [14] FAN H. *Theory of Errors and Least Squares Adjustment* [M]. Tekniska högskolan, 1997.

作者简介:



郭献涛(1985—),男,河南驻马店人,博士研究生,2009年于华北水利水电学院获得学士学位,2012年于辽宁工程技术大学获得硕士学位,主要从事地面三维激光扫描技术及变形监测的研究。
E-mail: xiantaoguo@gmail.com

导师简介:



黄腾(1957—),男,江苏南京人,研究员,博士生导师,1980年、1995年于华东水利学院(现河海大学)分别获得学士、硕士学位,主要从事精密工程测量和大型工程安全监控理论与应用的研究。
E-mail: njht0911@163.com

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)