

相位式地面三维激光雷达实验室检校

李 振¹ 王 辉² 蒋宇雯²

1 扬州大学水利与能源动力工程学院,江苏 扬州,225127

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:建立了地面三维激光雷达系统误差的基本模型和参考模型,推导了平差模型。综合物理意义和经验的系统误差,利用实验室检校场,对相位式地面三维激光雷达 FARO Focus3D 进行了检校实验。实验得到了 FARO Focus3D 的系统误差改进模型,并验证了其有效性。

关键词:地面三维激光雷达;参考模型;实验室检校;改进模型

中图法分类号:P231.5

文献标志码:A

地面三维激光雷达利用激光无反射棱镜长距离快速测距和空间点阵扫描技术,能主动、非接触、高速获取高分辨率、高精度三维空间信息,成为地面获取空间信息的重要途径之一。但是,扫描的点云精度也会受到硬件、环境和扫描目标等因素的影响。其中,硬件相关的系统误差可以通过检校来降低或消除。国内学者的研究^[1-3]中,主要从激光雷达测距原理出发,讨论加常数和乘常数等部分物理意义上的系统误差的检校模型,对于一些经验的系统误差并没有进行讨论。国外学者在地面三维激光雷达自检校技术及其降低待求参数相关性的方法方面进行了大量研究^[4-6],在研究中称其为自检校技术,利用全站仪测量少量控制点,可以降低外方位元素与其他待求元素的相关性。国内的学者主要研究关键参数检校技术,这种技术需要已知精确的地面三维激光雷达系统误差模型,并需要建立特殊的实验场所,例如检校基线等。基于此,本文进行了研究,建立了地面三维激光雷达系统误差的模型。

1 系统误差建模

1.1 基本模型和参考模型

地面三维激光雷达的数据采集方式与免棱镜全站仪相似。获取目标在极坐标系下的距离 ρ 以及扫描旋转的水平角 θ 、竖直角 α ,将其转换到笛

卡尔直角坐标系下,扫描点的三维坐标为 (x, y, z) 。

大部分学者采用免棱镜全站仪的系统误差模型作为地面三维激光雷达系统误差的基本模型:

$$\begin{cases} \Delta\rho = a_0 \\ \Delta\theta = b_1 \sec\alpha + b_2 \tan\alpha \\ \Delta\alpha = c_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\Delta\rho$ 、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\alpha$ 分别为距离、水平角和竖直角

1.2 系统误差模型的建立

利用点云数据和系统误差的基本模型进行检校平差,可以在观测值改正数分布图中找到一些系统趋势项。分析这些系统趋势项可以确定其他系统误差系数,从而建立更准确的系统误差模型。

相关研究^[7-8]中提出了许多不同的物理校验参数和实验校验参数,通过总结建立地面三维激光雷达系统误差的参考模型:

$$\begin{aligned} \Delta\rho &= a_0 + a_1\rho + a_2\sin\alpha + a_3\sin\left(\frac{4\pi}{U_1}\rho\right) + \\ & a_4\cos\left(\frac{4\pi}{U_1}\rho\right) + a_5\sin\left(\frac{4\pi}{U_2}\rho\right) + a_6\cos\left(\frac{4\pi}{U_2}\rho\right) + \\ & a_7\sin 4\theta + a_8\cos 4\theta \\ \Delta\theta &= b_1\sec\alpha + b_2\tan\alpha + b_3\sin 2\theta + \\ & b_4\cos 2\theta + b_5\theta + b_6\cos 3\alpha + b_7\sin 4\alpha \\ \Delta\alpha &= c_0 + c_1\alpha + c_2\sin\alpha + c_3\sin 3\theta \\ & + c_4\sin 3\theta \end{aligned} \quad (2)$$

收稿日期:2013-05-08

项目来源:江苏省高校自然科学研究面上资助项目(13KJB420005);江苏省水利动力工程重点实验室开放课题资助项目(K12016);国家青年自然科学基金资助项目(41201484);扬州大学高层次人才科研启动基金资助项目(0574870015672)。

第一作者:李振,博士,现从事遥感图像处理 and 三维激光雷达测量技术研究。

式中, a_i 、 b_i 和 c_i 为系统误差改正项系数。

系统误差的参考模型是一个理论和经验综合的模型,地面三维激光雷达的类型不同,系统误差改正项系数组成就不同。因此,需要针对特定的地面三维激光雷达,基于系统误差基本模型和参考模型以及检校平差方法,建立特定的有效系统误差模型。

2 平差模型

本文主要研究相位式地面三维激光雷达 FARO Focus3D 的系统误差模型,但以下的数学模型经过简单修改后也可用于其他类型的扫描仪自检校中。

2.1 数学模型

为了利用实验室检校场的靶标,建立统一的靶标点坐标,共定义了两种坐标系:全局坐标系和扫描坐标系,如图1所示。

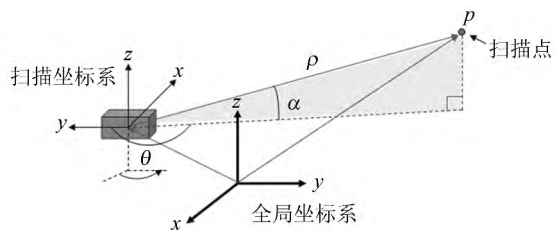


图1 坐标系定义

Fig. 1 Definition of Coordinate System

扫描点 j 在某测站 i 从扫描坐标系中转换至全局坐标系的严格数学表达式为:

$$\begin{bmatrix} X_j^e \\ Y_j^e \\ Z_j^e \end{bmatrix} = R_1(\kappa^{(i)}) R_2(\varphi^{(i)}) \cdot R_3(\omega^{(i)}) \begin{bmatrix} x_j^{(i)} \\ y_j^{(i)} \\ z_j^{(i)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X^{(i)} \\ \Delta Y^{(i)} \\ \Delta Z^{(i)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)为地面三维激光雷达检校平差数学模型的基本公式,式中包含了扫描点的全局坐标(已知或未知)、测站扫描坐标和待求的未知参数。

式(3)中,测站扫描坐标可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x_j^{(i)} \\ y_j^{(i)} \\ z_j^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\rho_j^{(i)} - \Delta\rho) \cos(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \cos(\alpha_j^{(i)} - \Delta\alpha) \\ (\rho_j^{(i)} - \Delta\rho) \sin(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \cos(\alpha_j^{(i)} - \Delta\alpha) \\ (\rho_j^{(i)} - \Delta\rho) \sin(\alpha_j^{(i)} - \Delta\alpha) \end{bmatrix} \quad (4)$$

基于式(3)的数学模型,采用附有参数的条件平差建立检校平差法方程:

$$\begin{matrix} B & V & + & A & \delta X & = & W \\ r \times r \times 1 & & & r \times u & u \times 1 & & r \times 1 \end{matrix} \quad (5)$$

$$W = - (f(L^0, X^0) + B(L - L^0))$$

式中, L 为观测值向量; L^0 为观测值的初值; X 为待求参数向量, X^0 为待求参数的初值; 矩阵 B 和 A 分别为线性化后的系数矩阵; f 为平差函数; δ 表示微分量。

2.2 精度评定及系统误差模型检验

平差完成后,可由改正数 V 得到后验单位权中误差:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{u} \quad (6)$$

式中, u 为参数个数。

设观测值 L 的协因数为 Q , 参数 X 的协因数:

$$Q_{XX} = N_{aa}^{-1} \quad (7)$$

式中, $N_{aa} = A^T N_{bb}^{-1} A$, $N_{bb} = B Q B^T$ 。

通过分析式(7)中的协因数阵,可以得到参数自身的可靠性程度和参数之间的相关性。若某改正项系数与其他参数的相关性较大,则有必要考虑该改正项系数的取舍。

对平差后观测量 L 的改正数 V 进行分析。若系统误差模型有效,观测量 L 在经过系统误差改正后只受高斯噪声影响, V 呈现高斯正态随机分布;若系统误差改正不完全,则 V 的分布仍存在某种系统趋势,但不同于高斯正态分布。

3 实验及分析

3.1 检校实验

实验采用 FARO Focus3D 三维激光扫描仪。其水平角观测值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 竖直角观测值范围为 $-62.5^\circ \sim +242.5^\circ$ 。为了进行自检校实验,建立了一个 $11\text{ m} \times 5\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的实验室检校场。在检校场的南、北、西三面墙共设立了 118 个球形靶标作为自检校实验的控制点。

实验中分别设左右两个测站,对检校场进行扫描。利用 Cyclone 软件提取球形靶标中心的扫描坐标。由于遮挡等问题,左站扫描数据中提取了 88 个靶标中心,右站扫描数据中提取了 90 个靶标中心。

3.2 数据处理

3.2.1 基本模型实验

将提取的靶标中心作为检校控制点,利用上文的检校平差方法对所有控制点进行系统误差基本模型检校的实验。实验所得的系统误差改正数

和部分待求参数协因数如表 1 所示。

表 1 基本模型的系统误差改正数结果

Tab. 1 System Error Correction Result of Basic Model

CPs	数值	协因数阵系数	
		CP-EOP(左站)	CP-EOP(右站)
a_0/mm	1.02	$b_1/\Delta Y: 0.135\ 26$	$b_1/\Delta Y: -0.100\ 00$
b_1	$0.029\ 3^\circ$	$b_2/\Delta Y: -0.063\ 13$	$b_2/\Delta Y: 0.265\ 51$
b_2	$-0.045\ 6^\circ$	$b_2/\Delta Z: 0.097\ 93$	$b_2/\Delta Z: 0.115\ 69$
c_0	$0.019\ 4^\circ$	$c_0/\Delta Z: -0.135\ 49$	$c_0/\Delta Z: -0.151\ 63$

基本模型检校后观测值改正数(左站)分布图如图 2~4 所示。

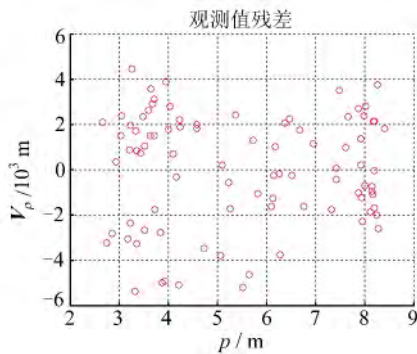


图 2 距离改正数 V_ρ 随距离观测值的变化

Fig. 2 Distance Correction V_ρ Change with Distance Observations

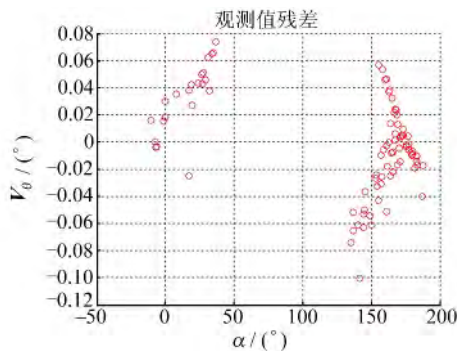


图 3 水平角改正数 V_θ 随垂直角观测值的变化

Fig. 3 Horizontal Angle Correction V_θ Change with

Vertical Angle Observations

从表 1 可知,基本模型中各系统误差改正系数数值不大,与其他待求参数不存在明显的相关关系。地面三维激光雷达系统误差的基本模型是所有激光雷达系统误差检校的基础,其模型改正项系数必须保留。由图 2~4 可以看出,经过基

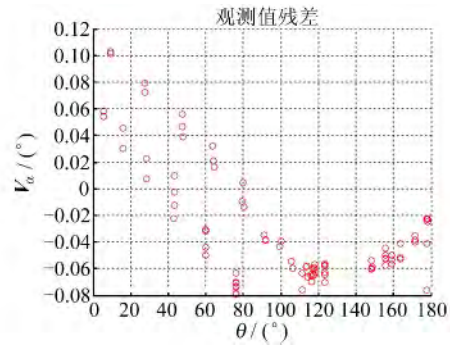


图 4 竖直角改正数 V_θ 随水平角观测值的变化

Fig. 4 Vertical Angle Correction V_θ Change with Horizontal Angle Observations

本系统误差模型改正后,距离观测量的改正数的变化趋势不明显,距离改正数范围都在 mm 级,但水平角观测量和竖直角观测量有明显的变化趋势,尤其是竖直角改正数随水平角变化有一个余弦趋势(见图 4),说明基本模型对距离的系统误差有一定的改正效果,但对水平角和竖直角的系统性趋势可以利用参考模型中其他的改正项系数进一步消除。

3.2.2 改进模型实验

在基本模型的基础上,对参考模型中其他的改正项系数进行逐一实验。将每个改正项系数单独加入基本模型中建立改进模型。利用所有控制点,比较改进模型检校结果与基本模型检校结果的差异。若观测值改正数的范围和分布趋势有明显减小,则认为该系统误差改正项系数有效。

将有效的改正项系数综合建立改进模型,通过比较,对改进模型各项系数进行进一步取舍,建立了最终的系统误差改进模型:

$$\begin{cases} \Delta\rho = a_0 + a_3 \sin(\frac{4\pi}{U_1}\rho) + a_4 \cos(\frac{4\pi}{U_1}\rho) + \\ a_7 \sin 4\theta + a_8 \cos 4\theta \\ \Delta\theta = b_1 \sec\alpha + b_2 \tan\alpha + b_7 \sin 4\alpha \\ \Delta\alpha = c_0 + c_1\alpha \end{cases} \quad (8)$$

式中, U_1 为最优单元长度,取 0.6 m。

利用上文的检校平差方法和改进模型对所有控制点的系统误差进行检校实验,得到的系统误差改正数如表 2 所示。

表 2 改进模型的系统误差改正数结果

Tab. 2 System Error Correction Result of Modified Model

CPs	数值				
距离系统误差改正/mm	$a_0: 0.913$	$a_3: 0.082$	$a_4: -0.015\ 3$	$a_7: -0.016$	$a_8: 0.024$
水平角系统误差改正		$b_1: 0.029\ 7^\circ$	$b_2: -0.014\ 92^\circ$	$b_7: 0.029\ 0^\circ$	
竖直角系统误差改正		$c_0: 0.036\ 6^\circ$	$c_1: 0.461\ 5\ \text{ppm}$		

改进模型检校后观测值改正数(左站)分布图
如图 5~7 所示。

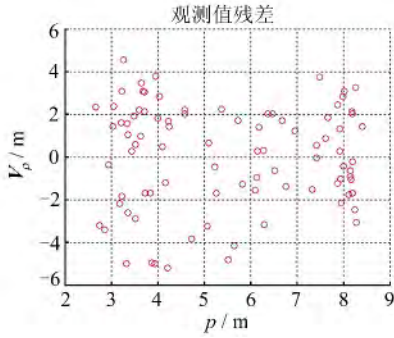


图 5 距离改正数 V_p 随距离观测值的变化
Fig. 5 Distance Correction V_p Change with Distance Observations

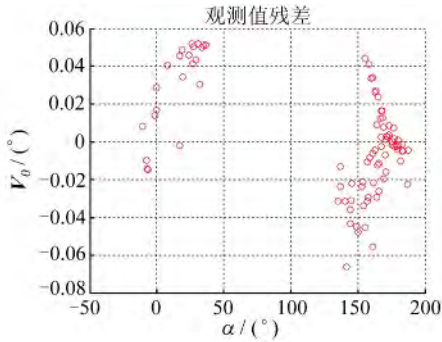


图 6 水平角改正数 V_θ 随竖直角观测值的变化
Fig. 6 Horizontal Angle Correction V_θ Change with Vertical Angle Observations

距离观测量的系统误差改正模型中加入的 a_3 、 a_4 和 a_7 、 a_8 中, a_3 、 a_4 是相位式激光雷达的固有周期性误差, a_7 、 a_8 是经验误差。虽然基本模型中

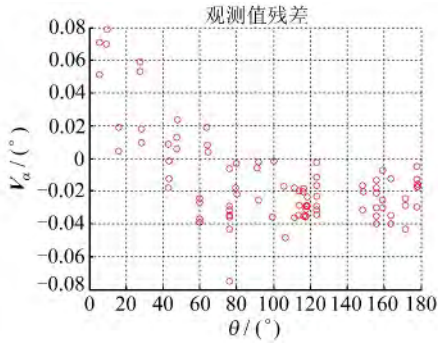


图 7 竖直角改正数 V_α 随水平角观测值的变化
Fig. 7 Vertical Angle Correction V_α Change with Horizontal Angle Observations

的距离观测量改正数并没有表现出相应的正弦余弦趋势,但是由于各观测量的系统误差改正项之间存在一定的相关关系,因此在进行水平角或竖直角的系统误差建模时,需要综合考虑其他观测量的系统误差改正系数的影响。由图 5~7 的检校结果可看出,改进模型使得竖直角改正数随水平角变化的余弦趋势减弱,其他观测量的改正数分布范围也有所减小,因此,改进模型对观测量系统误差的改正效果明显。

3.2.3 实验比较分析

比较基本模型和改进模型的观测量改正数范围及分布情况,如表 3 所示。由表 3 可知,与基本模型的检校结果对比,改进模型在左右两站上的距离、水平角和竖直角改正数的范围有一定缩小,并且其分布相对集中。这说明改进模型比基本模型有效,改进模型能更进一步消除观测量的系统误差。

表 3 基本模型和改进模型的观测量改正数范围和分布情况比较

Tab. 3 Comparison of Range and Distribution of Observation Correction Between Basic and Modified Models

	基本模型		改进模型	
	左站	右站	左站	右站
距离改正数范围/mm	-6~5	-6~6.5	-5~5	-6~6.5
水平角改正数范围	-0.1°~0.08°	-0.05°~0.06°	-0.07°~0.06°	-0.05°~0.06°
竖直角改正数范围	-0.08°~0.1°	-0.05°~0.04°	-0.08°~0.08°	-0.05°~0.04°
95.5%点的距离改正数分布/mm	-5~4	-5.7~4	-4.9~3.4	-5.7~3.85
95.5%点的水平角改正数分布	-0.065°~0.065°	-0.04°~0.04°	-0.0452°~0.051°	-0.04°~0.04°
95.5%点的竖直角改正数分布	-0.075°~0.07°	-0.04°~0.044°	-0.068°~0.0535°	-0.0378°~0.03°

4 结 语

本文基于地面三维激光雷达系统误差的基本模型和参考模型,建立了 FARO Focus3D 的系统误差改进模型。实验室检校实验表明,改进模型比基本模型有效,可以更进一步消除观测量改正

数的系统趋势。

尽管本文只针对了一种激光雷达进行检校实验,但采用的检校数学模型也适用于其他类型的地面三维激光雷达。对不同的地面三维激光雷达的实验室检校研究是今后进一步探讨的方向。

参 考 文 献

- [1] Zhang Yi, Yan Li, Yang Hong, et al. Spherical Center Error of Sphere Target in TLS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 598-601(张毅, 闫利, 杨红, 等. 地面激光扫描球形标靶的球心误差研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(5): 598-601)
- [2] Yang Ronghua, Hua Xianghong, Qiu Weining, et al. Research on the Point Cloud Angular Resolution of Terrestrial Laser Scanners[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(7): 851-853(杨荣华, 花向红, 邱卫宁, 等. 地面三维激光扫描点云角度分辨率研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(7): 851-853)
- [3] Zhang Yi, Yan Li, Yang Hong, et al. Research on Systematic Error Model of Terrestrial Laser Scanning[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012, 1: 16-19(张毅, 闫利, 杨红, 等. 地面三维激光扫描的系统误差模型研究[J]. 测绘通报, 2012, 1: 16-19)
- [4] Lichiti D D, Stewart M P, Tsakiri M, et al. Calibration and Testing of a Terrestrial Laser Scanner[J]. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B5/2, PART 5): 485-492
- [5] Lichti D D. A Method to Test Differences Between Additional Parameter Sets with a Case Study in Terrestrial Laser Scanner Self-calibration Stability Analysis[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63(2): 169-180
- [6] Schulz T. Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy[D]. Switzerland: ETH-Zurich, 2007
- [7] Lichti D D. Error Modeling, Calibration and Analysis of an AM-CW Terrestrial Laser Scanner System[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 61(5): 307-324
- [8] Reshetyuk Y. Self-calibration and Direct Georeferencing in Terrestrial Laser Scanning[D]. Switzerland: KTH, 2009

Laboratory Calibration of Phase-terrestrial 3D Laser Scanner

LI Zhen¹ WANG Hui² JIANG Yuwen²¹ School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China² School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Hardware-related system errors of terrestrial 3D laser scanner can be reduced or eliminated by calibration. Basic model and reference model of terrestrial 3D laser scanner system errors were established. Laboratory calibration adjustment model was deduced. After the adjustment was completed, exterior orientation elements, global coordinates of targets, coefficients of system error and observations of corrected random error can be acquired. Considering both physically interpretable and empirically identified components, phase-terrestrial FARO Focus3D self-calibration test was conducted in a laboratory calibration room. The influence of the number and distribution of control points on the residual distribution of observations and system error modeling were analyzed by calibration experiments. The modified model of FARO Focus3D system errors was established. The effectiveness of modified model was proved.

Key words: terrestrial 3D laser scanner; reference model; laboratory calibration; modified model

First author: LI Zhen, PhD. His research interests are remote sensing image processing and 3D laser imaging Radar. E-mail: lizhen@yzu.edu.cn

Foundation support: The General Program of Natural Science of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province, No. 13KJB420005; the Open Project Program of the Hydrodynamic Engineering Laboratory of Jiangsu Province, No. K12016; the National Science Foundation for Young Scholars, No. 41201484; the Research Foundation for Advanced Talents of Yangzhou University, No. 0574870015672.