

# 基于三维控制场的三维激光扫描仪点位精度评定

史 波, 郑 敏

(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**为评定三维激光扫描仪的精度,设计了一个基于室内三维控制场的 RIEGL VZ-400 点位精度评定方案。通过实测得到其在距离 10 m 左右的外部、内部符合精度分别为  $\pm 1.675$  mm 和  $\pm 0.48$  mm。详细介绍了室内全景三维控制场的布设、数据采集以及点位精度的评定方法。研究结果可为地面三维激光扫描仪的工程应用提供精度依据。

**关键词:**室内全景三维控制场; RIEGL VZ-400; 坐标转换; 点位精度

中图法分类号: TV698

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.03.008

三维激光扫描仪作为新型测绘手段具有高数据采样率、高精度、实时性、主动性、非接触性和复杂环境测量等特点,可以实现对各种大型、不规则、非标准实体或实景的三维数据采集,目前已在地形测量、数字文物、变形监测、数字城市、影视特技等领域得到了初步应用。

由于受测量环境、仪器部件磨损及系统误差等影响,三维激光扫描仪实测精度可能与标称精度不符,需进行可靠性测试以保证测量成果的可靠性。目前国内学者在这方面进行了一定研究,张启福等进行了基于简易六段法的 RIEGL VZ-400 精度测试研究,Chris Tucker 测试了 CyraX2500 视场范围和不同距离上的单点精度等<sup>[1-2]</sup>。

本文基于高精度的室内全景三维控制场,借助平面标靶对 RIEGL VZ-400 地面三维激光扫描仪的点位精度进行了实地测试,得出了该仪器在实际工作环境中一定距离范围内能够达到的精度指标。同时,本研究可为地面三维激光扫描技术的广泛应用提供借鉴和经验。

## 1 室内全景三维控制场

### 1.1 控制场标靶的布设

全景三维控制场中有平面和球形两种标志,平面标志为 8 cm × 8 cm 的黑色铝制薄片,薄片中部是由反光材料制作的直径 5 cm 的白色圆,圆心处为黑色十字丝,如图 1 所示。



图 1 平面测量标靶

平面标志主要布设在全景控制场的东侧,如图 2 所示的底纹区域,平面标志均匀地分布在大体平行的 4 个铅直面内,除墙面外,其他 3 个铅垂面均由铝合金杆组成,如图 3 所示。墙面按 40 cm × 40 cm 的间隔均

收稿日期:2014-10-20

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划“膨胀土渠道及高填方渠道安全监测预警技术”(2011BAB10B07)

作者简介:史波,男,助理工程师,硕士研究生,主要从事水利水电工程安全监测等方面研究工作。E-mail:ejwjcgz\_zm@126.com

匀布设,共  $9 \times 19$  列;每根铝合金杆上采用强力胶粘贴约 18 个平面标志,共 166 个平面测量标志<sup>[3]</sup>。

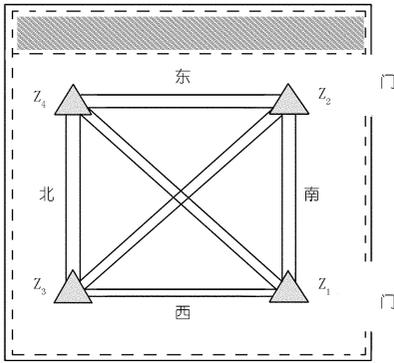


图 2 三维控制场示意



图 3 铝合金杆

## 1.2 三维控制网

该控制场中标志点坐标采用经纬仪三维测量系统进行测量,此室内精密三维基准网采用一体化布网,4 个测站点 ( $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ ) 构成大地四边形网(如图 4),测站顶部用强制对中装置,既可作为平面基准也可作为高程基准。平面基准采用测角确定网的形状,同时由基准尺引入长度基准,平面网按常规边角网进行平差(附有限制条件的间接平差模型)计算;高程基准网采用三角高程的方法进行观测。为确保取得高精度的观测值,在平面基准网方向观测时,基座上放置精密三爪式连接器;在进行长度精密传递时,按照如图 4 所示的方式布设 3 m 水准标尺。最后,所有标靶点位精度达  $\pm 0.1$  mm,将其视作真值。

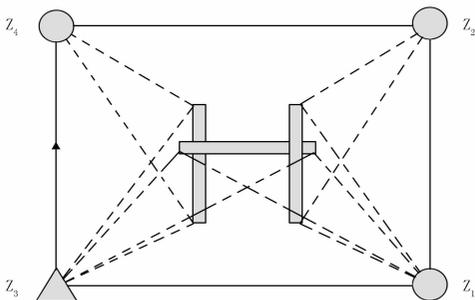


图 4 标准尺布设示意

## 2 数据采集

### 2.1 实验仪器

此次实验所采用的 RIEGL VZ-400 三维激光扫描系统是由瑞士 RIEGL 公司生产的,它采用的是全波形回波技术(Waveform digitization)和实时全波形数字化处理和分析技术(on-line waveform analysis),可以高精度探测到多重目标的详尽细节信息<sup>[4]</sup>。其特性参数如下。

扫描类型	脉冲
扫描距离	1 ~ 500 m
测距精度	2 mm@100 m
发射频率	300 000 点/s
视场范围	100° 360°
激光等级	I 级
激光波长	近红外
集成相机	Nikon D700(1210 万像素)
电源	11-32V DC 60W
角度分辨率	0.0005°
角度步进频率	0.0024° ~ 0.288°(水平);0.5°
温度范围	0°C ~ 40°C(使用), -10°C ~ 50°C(存放)
数据存储	8G Byte 闪存
接口	LAN WLAN USB2.0
扫描机制原理	旋转多面棱镜(垂直) 选择扫描头机身(水平)
扫描速度	3 线/s ~ 120 线/s(垂直) 0°/s ~ 60°/s(水平)
扫描仪尺寸	308 mm(长), 180 mm(直径)
扫描仪重量	9.8 kg

### 2.2 扫描对象、方案及坐标系的确定

(1) 根据点位精度评定原则,需要建立一个高精度的控制场。此次实验以武汉大学测绘学院建立的室内全景三维控制场为扫描对象,该控制场内共有将近 300 个已知空间坐标(精度达  $\pm 0.1$  mm)的平面标志。

(2) 扫描过程中采用自由坐标系,通过公共反射标靶利用 RISCAN RPO 进行坐标转换,将扫描坐标系(SCOS)与室内控制场坐标系(GLCS)进行统一。

(3) 为了检验 RIEGL VZ-400 的重复扫描精度,通过改变扫描仪的位置,对室内三维控制场进行 5 次重复扫描。

### 2.3 设置扫描参数

RIEGL VZ-400 是采用 Line Scan(线扫描)的方式进行数据采集的,需要对其扫描距离、水平与垂直采样间隔、重复采样次数进行设置。根据三维激光扫描

技术误差影响分析和精度控制方法得知,扫描仪的测距精度随着距离的增大而减弱,点云数据的密度随采样间隔的增大而减小,重复扫描可以提高点位精度。此次实验根据 RIEGL VZ-400 扫描仪本身的特性和室内三维控制场的范围,扫描距离设置为 10 m,水平和垂直步进角频率设置为 0.005°,重复采样次数设为 1,扫描倾角控制在 50°。

### 2.4 现场扫描、分析

RIEGL VZ-400 具有 HMI 界面,是一台人机交互式的测量仪器,可以直接利用仪器进行数据采集,为了操作方便,利用笔记本电脑通过 TCP/IP Ports 与 RIEGL VZ-400 连接,将笔记本电脑和扫描仪上的 IP 分别设为:192.168.0.123 和 192.168.0.119。通过 RISCAN PRO 启动 RIEGL VZ-400,先对室内控制场进行粗扫,然后精扫,寻找反射片,最后对反射片进行精扫,整个扫描过程持续了 1 d,获得了整个三维控制场的三维坐标数据,如图 5 所示。

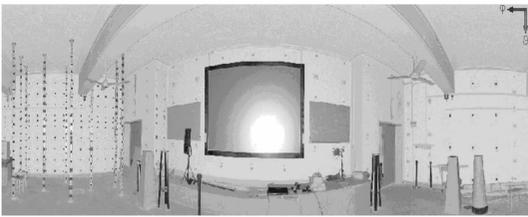


图 5 室内全景三维控制场扫描结果

## 3 点位精度评定与分析

### 3.1 扫描坐标的转换

在扫描区域内提取 6 个公共反射标靶(均匀分布在扫描区域内)作为公共点,其在 SCOS 和 GLCS 下的坐标见表 1。

表 1 公共反射标靶在不同坐标系下的坐标 m

点号	SCOS(扫描坐标系)			GLCS(控制场坐标系)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
4104	-3.187	-2.205	-0.673	-9.3623	9.2965	-16.1441
4304	-4.149	0.844	-0.686	-6.1616	9.3063	-16.2138
4116	-3.159	-2.179	1.724	-9.3635	11.6961	-16.1457
1804	-5.747	-2.185	0.037	-8.6342	9.9712	-18.6046
1E04	-6.426	0.114	0.022	-6.237	9.9737	-18.6191
4507	-4.524	2.579	1.252	-4.4055	11.2594	-16.1286

利用 RISCAN PRO 的 Registration 模块进行坐标转换,得到坐标转换(SOP)矩阵,如图 6 所示。

最后将扫描仪坐标系下的 53 个反射标靶的坐标转到控制场坐标系下,用来评定下一步的点位精度。

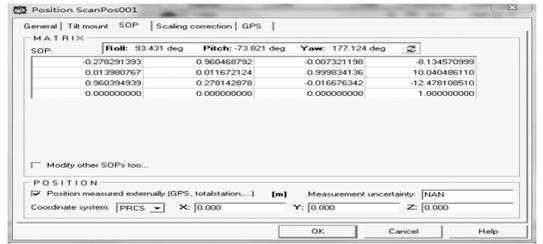


图 6 坐标转换(SOP)矩阵

### 3.2 点位精度评定

本文采用以下两种方案对 RIEGL VZ-400 的点位精度进行评定。

(1) 第一种方案是利用 3.1 节中得到的扫描坐标成果与真值比较进行点位精度评定,也可称为三维激光扫描仪单点定位外部精度符合评价方案。利用该方案检测三维激光扫描仪是否可以达到高精度测量仪器的精度水平,从而得到直观的评价<sup>[5]</sup>。

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^2 x_i + \sum_{i=1}^n \Delta^2 y_i + \sum_{i=1}^n \Delta^2 z_i}{3n}} \quad (1)$$

式中,  $\Delta x_i = x_i - x'_i$ ,  $\Delta y_i = y_i - y'_i$ ,  $\Delta z_i = z_i - z'_i$ ,  $x_i, y_i, z_i$  为控制场坐标系中的坐标;  $x'_i, y'_i, z'_i$  为对应的扫描坐标;  $n$  为控制点数。 $\sigma_m$  值越大,坐标转换误差越大;  $\sigma_m$  值越小,坐标转换误差越小。

选取 40 个扫描坐标与对应真值作差,见表 2,然后按照(1)式计算得到 10 m 左右 RIEGL VZ-400 的点位精度  $\sigma_m = \pm 1.675$  mm。

(2) 第二种方案是对同一目标重复测量的数据对比分析进行点位精度评价,也可称为三维激光扫描仪单点定位内部精度符合评价方案。这种方案可以很好地得出三维激光扫描仪的测量稳定性和其自身的测量精度,并可同仪器厂商提出的标称精度进行比较,得出是否满足其要求<sup>[6]</sup>。

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{3n}} \quad (2)$$

式中,  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ ,  $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ ,  $\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}$ ,  $x_i, y_i, z_i$  为提取中心点的坐标,  $i = 1, 2, \dots, n$  为扫描次数。

本次实验对该控制场进行了 5 次重复扫描,求出重复扫描较差,见表 2,利用公式(2)计算得到 RIEGL VZ-400 的内部符合精度  $\sigma_p = \pm 0.48$  mm。

### 3.3 点位精度分析

(1) 外符合精度。实验中,扫描仪与标靶的距离

表2 RIEGL VZ-400 扫描坐标与对应真值的差及重复扫描坐标较差(部分)

mm

点号	扫描坐标与对应真值的差			重复扫描坐标较差			点号	扫描坐标与对应真值的差			重复扫描坐标较差		
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$		$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$
1A04	0.1	1.6	-0.5	0.00	1.00	2.00	1G07	0.2	1.9	0.5	1.00	-1.00	-1.00
1C04	-0.3	1.9	-0.3	0.00	1.00	-1.00	2104	2.1	2.3	2.5	1.00	0.00	1.00
1D04	-0.3	1.7	1.1	0.00	1.00	-1.00	3104	1.2	-0.6	1.0	0.00	2.00	-1.00
1E04	0	1.7	0.9	0.00	1.00	1.00	3204	0.5	-1.2	0.7	1.00	0.00	0.00
1F04	0.2	2.1	1.2	0.00	1.00	1.00	1604	-0.3	0.7	0	0.00	1.00	0.00
1G04	-0.5	1.7	0.3	0.00	0.00	1.00	1804	-0.2	1.2	2.4	0.00	1.00	-1.00
1C07	-0.5	1.4	1.3	0.00	1.00	3.00	1704	-0.5	1.1	-1.6	1.00	0.00	-3.00
1D07	-0.5	1.6	1.4	0.00	0.00	3.00	1304	-0.3	-0.2	-3.3	-1.00	1.00	-2.00
1E07	-0.8	1.6	2.3	1.00	0.00	1.00	2204	-0.1	1.5	4.8	-1.00	1.00	1.00
1F07	-0.2	1.3	-1	0.00	1.00	0.00	4304	2.4	-1.7	1.2	0.00	1.00	0.00

在 10 m 左右,选取 40 个扫描坐标值与真值进行比较,以此评价外部符合精度,点位中误差见表 3。从表中可以看到,在  $X$  和  $Y$  方向的定位精度优于 1 mm,明显高于  $Z$  方向, $Z$  方向主要受垂直角观测精度的影响,单点定位的精度优于 2 mm,符合其标称精度。

(2) 内符合精度。同样,选取了 47 个点进行内部符合精度评定,得到 RIEGL VZ-400 的内部符合精度  $\sigma_p = \pm 0.48$  mm,  $X$  与  $Y$  方向的差值基本在 1 mm 以内, $Z$  方向大部分在 2 mm 以内,少部分点为 3 mm,与外部符合精度评定的出来的结论一样, $Z$  方向精度略低。

表3 RIEGL VZ-400 单点定位中误差 mm

$X$	$Y$	$Z$	单点
0.654	0.718	1.365	1.675

(3) 竖直角对点位精度的影响。控制场中很多标靶是按一列一列方式布设的,选取其中两列数据(同一铝合金杆上的反射标靶)分析竖直角对点位精度的影响。图 7 是扫描坐标值与真值的差值,随着竖直角度的增加,坐标差值并没有明显增大或减小的趋势,在扫描过程中可以忽略竖直角对点位精度的影响。

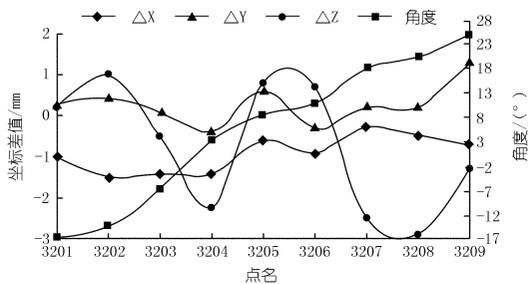


图7 扫描坐标的点位精度与竖直角之间的关系(第1列)

## 4 结语

本文设计了一个基于室内全景三维控制场的 RIEGL VZ-400 点位精度评定方案,利用控制场内高精度的靶标坐标,通过实地数据采集、坐标转换,得到扫描坐标。利用扫描坐标与真值的差值对 RIEGL VZ-400 的外部符合精度进行了评定,得出其在 10 m 左右的范围内的点位精度为  $\pm 1.675$  mm 的结论,符合其标称精度,能满足一定生产需求。通过对同一控制场的重复扫描,对 RIEGL VZ-400 的内部符合精度进行了评定,得出其在 10 m 左右的范围内的点位精度为  $\pm 0.48$  mm 的结论,内部符合精度很高,表明仪器稳定。同时利用控制场标靶布设成列的特点,分析了竖直角的大小对点位精度的影响,得出竖直角的大小对点位精度影响并不明显的结论。

## 参考文献:

- [1] 施贵刚. 地面三维激光扫描数据处理技术及作业方法的研究[D]. 上海:同济大学,2009.
- [2] 张启福,孙现申,王力. 基于简易六段法的 RIEGL VZ-400 激光扫描仪精度测试方法研究[J]. 工程勘察,2011,(3):63-66.
- [3] 梅文胜,徐芳. 室内全景三维控制场设计与建立[J]. 测绘信息与工程,2011,36(6):39-42.
- [4] RIEGL. 3D Terrestrial Laser Scanner with Online Waveform Processing[EB/OL]. [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/10\\_DataSheet\\_VZ400\\_20-09-2010.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_VZ400_20-09-2010.pdf),2009,(03).
- [5] 王玉鹏,卢小平. 地面三维激光扫描点位精度评定[J]. 测绘通报,2011,(4):10-13.
- [6] 向娟,李钢. 三维激光扫描单点定位精度评定方法研究[J]. 海洋测绘,2009,29(3):68-73.

(编辑:赵凤超)

(下转第 37 页)

[10] 鲁铁定,周世健,官云兰,等. GPS 高程转换中高程异常粗差的检验与分析[J]. 工程勘察,2004,(4):51-54.

[11] 侯建国,王腾军. 变形监测理论与应用[M]. 北京:测绘出版社,2008.

(编辑:赵凤超)

## Analysis on GNSS height fitting model based on weighted least squares

ZHU Baoxun<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>2</sup>, WANG Xiaojing<sup>1</sup>, GAO Ning<sup>1</sup>

(1. College of Surveying Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410006, China)

**Abstract:** Generally, the GNSS height fitting is based on the classic Gauss - Markov model, in which the least square solution is not optimal because the influential factors of each observed value are ignored. The paper puts forward a direct weighing determining method on the basis of quadric surface fitting model by discussing the differences among several types of weighted least squares models, so as to obtain the optimal solution. The direct weighing method is compared with iteration method with variable weights and the recursive weighted least squares method by experiments, and the results show that there is little difference in the accuracy of above three methods, the direct weighing determining method is simple and practical for practical applications.

**Key words:** GNSS height fitting; weighted least squares; weight; gross error

(上接第30页)

## Positional precision evaluation of 3D laser scanner based on 3D control field

SHI Bo, ZHENG Min

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** For evaluating the precision of a 3D laser scanner, we designed a positional precision evaluation solution for RIEGL VZ - 400 on the basis of the 3D indoor panoramic control field. Through the evaluation, the precision of external and internal position at distance of 10 m is  $\pm 1.675\text{mm}$  and  $\pm 0.48\text{mm}$  respectively. The layout, data collection way and the positional precision evaluation method are introduced. The results could provide experiences and references for the application of ground 3D laser scanners.

**Key words:** 3D indoor panoramic control field; RIEGL VZ - 400; coordination transformation; positional precision

· 科技动态 ·

## 南水北调中线干线水污染应急处置决策支持系统 软件获计算机软件著作权

2015年1月26日,长江勘测规划设计研究院环境公司与广州地理研究所联合开发的“南水北调中线干线水污染应急处置决策支持系统软件”(登记号为:2015SR014397)成功获得由国家版权局颁发的《计算机软件著作权登记证书》。

该软件以实时预警模型、异地引流闸控模型以及 Google Maps 技术为支撑,构建基于 B/S 和 C/S 混合构架可视化系统平台,明确污染事件影响范围、到达时间、到达浓度、停水时间;

基于模糊综合评价法对应急处置技术进行评估,筛选出污染物最优的处置方案;最后生成包括应急处置、应急监测、应急物资以及应急联络等应急指南,以指导和辅助应急处置工作。

该软件可为南水北调中线干线水污染应急处置提供数字化操作平台和决策支持,极大地提高了水污染事件应急处置效率和应对能力。

(长江)