

# 地面三维激光扫描点位精度评定

王玉鹏<sup>1,2</sup>, 卢小平<sup>1</sup>, 葛晓天<sup>1,2</sup>, 卢遥<sup>2</sup>, 宋碧波<sup>1,2</sup>

(1. 河南理工大学 矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室, 河南 焦作 454000)

2. 河南理工大学 测绘学院, 河南 焦作 454000)

## Point Precision Assessment for Terrestrial 3D Laser Scanning

WANG Yupeng LU Xiaoping GE Xiaotian LU Yaqi SONG Bibo

**摘要:** 通过建立高精度控制网作为室外检校场, 借助标靶对 Leica ScanStation2型三维激光扫描仪进行实地测试, 并对达到的点位精度进行分析与评定, 得出该仪器扫描距离为 40m、80m 时, 点位精度分别为  $\pm 4.7$  mm 和  $\pm 6.3$  mm。研究结果可为三维激光扫描技术的进一步应用提供经验和借鉴。

**关键词:** 地面三维激光扫描; 高精度控制网; 标靶; 点位精度

### 一、引言

三维激光扫描技术被认为是测绘领域继 GPS 之后的又一革命性技术, 它突出的优越性受到了业内人士广泛的重视, 对其点云数据精度的研究已成为当前学术界的热点。三维激光扫描技术又被称为高清晰测量 (high definition surveying) 技术<sup>[1]</sup>, 是通过高速激光扫描的方法, 快速获取大面积目标表面的高分辨率点云数据, 将测绘技术由过去点位测量带入到面和影像获取时代, 为快速建立物体三维模型提供了一种全新有效的技术手段。由于三维激光扫描技术具有速度快、非接触性、实时、动态、主动性, 及高密度、高精度, 数字化、自动化等特性, 并且可以深入到复杂的现场环境中, 实现对各种大型的、不规则的、非标准的实体或实景三维数据的完整采集, 已经在地形测量、公路与桥梁测量、土石方工程、建筑设计与测量、文物保护、灾害监测等领域得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。目前, 对点云数据的有效处理方法 (点云着色、点云数据的配准、点云冗余数据的剔除和抽稀、点云数据的表面重建等) 及其能够达到精度的研究, 已成为业内人士研究的热点。本文通过建立高精度室外检校场, 借助标靶对 Leica ScanStation2型三维激光扫描仪进行了实地测试, 并对点位精度进行了分析与评定, 得出了该仪器在实际工作环境中能够达到的精度指标。同时, 本研究可为三维激光扫描技术的广泛应用提供借鉴和经验。

### 二、检校场的建立

在室外布置高精度控制网作为检校场, 将测得的各目标点的三维坐标作为真值, 然后用地面激光扫描仪对上述目标进行扫描获得点云数据, 再把扫描数据通过坐标变换统一到控制网坐标系中, 通过对比分析扫描坐标的轴向误差, 从而计算得出扫描数据的精度。

#### 1 Leica ScanStation2介绍

Leica ScanStation2型地面激光扫描仪采用脉冲式激光测量原理, 在 50m 处激光束光斑直径恒定为 6mm, 内置高分辨率 CCD 相机和双轴补偿器, 具体技术参数如表 1 所示。

表 1 ScanStation2的技术指标

测距范围 /m	300(90% 反射率)	
	134(18% 反射率)	
扫描速度 / (点 / s)	50 000	
最小采样密度 /mm	< 1(任何距离)	
视场角 (H × V) / (°)	360 × 270	
单点精度 (50 m)	点位 /mm	±6
	距离 /mm	±4
	角度 / (°)	±0.004
形成模型表面精度 /mm	±2	

#### 2 控制网的建立

从表 1 可知, 厂家所提供的 ScanStation2型三维激光扫描仪的点位精度为  $\pm 6$  mm, 测距精度为  $\pm 4$  mm /50 m。为了检校扫描仪的数据精度, 要求

收稿日期: 2010-06-02 修回日期: 2010-11-17

基金项目: 2009年国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2009CB226107); 河南省2009年基础与前沿技术研究计划项目(092300410056)

作者简介: 王玉鹏(1987-), 男, 河南安阳人, 硕士生, 主要从事摄影测量与遥感领域的研究。

控制网内目标点的观测精度必须优于  $\pm 1 \text{ mm}$ , 方能作为真值。建立检校场及测量目标点三维坐标的步骤如下:

1) 在试验测区内设置标靶(如图 1所示)作为检校点, 数量为 18个, 表示为  $A_i (i= 1, 2, \dots, 18)$ 。靶标应按照网状布设, 严禁布置在一条直线上。



图 1 标靶

2) 将因瓦尺水平放置, 并将因瓦尺有刻划线的边缘作为假定空间坐标系(如图 2所示)的  $x$  轴,  $y$  轴位于  $x$  轴同一水平面上且与  $x$  轴互相垂直, 铅垂线为  $z$  轴<sup>[3]</sup>。

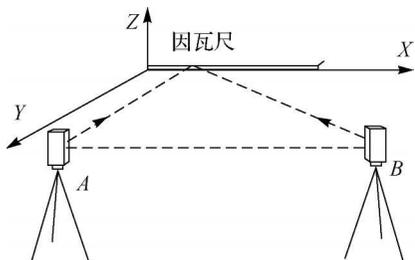


图 2 坐标系的建立

3) 选择因瓦尺上一定数目的刻划线作为已知平面控制点, 一般是在因瓦尺两端和中间各取几个刻划线, 其  $X$  坐标就是刻划线的刻度, 而  $Y$  坐标均相等, 则这些控制点的平面坐标为  $(X_1, 0)$ 、 $(X_2, 0)$ 、 $\dots$ 、 $(X_i, 0)$ 、 $(X_{18}, 0)$ 。

4) 考虑前方交会、后方交会的角度, 在合适的位置放置经纬仪。

5) 根据因瓦尺上选定的点位, 利用后方交会(如图 3所示)的方法可测出经纬仪中心(即竖轴与横轴的交点)的平面位置, 其精度依据后方交会点位中误差公式计算得到<sup>[4]</sup>

$$M_p = m \frac{b}{\rho_s \sin(\gamma + \delta)} \cdot \sqrt{\left(\frac{a_1}{s_1}\right)^2 + \left(\frac{a_2}{s_2}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{s_1}\right)\left(\frac{a_2}{s_2}\right) \cos(\gamma + \delta)} \quad (1)$$

结合本次方案(如图 3所示), 可以认为

$$\left. \begin{aligned} a_1 &\approx a_2 \approx b = 3 \text{ m} \\ s_1 &\approx s_2 \approx s = 0.5 \text{ m} \\ \alpha + \beta &= 180^\circ - (\gamma + \delta) \approx 20^\circ \end{aligned} \right\}$$

经纬仪的测角中误差为  $m = \pm 2.0''$ , 用 3 个测回观测, 则测站点位中误差为

$$M_p = \pm \sqrt{\frac{1}{3} \times \frac{2.0 \times 3000 \times 3}{206265 \times 0.5} \times \frac{\sqrt{2 + 0.094}}{0.34}} = \pm 0.51 \text{ mm}$$

如果观测的点数为 9 个, 取其中观测质量较好的组成 20 组等精度后方交会, 则 20 组平均值的中误差为

$$M = \frac{M_p}{\sqrt{n}} = \frac{\pm 0.51}{\sqrt{20}} \approx \pm 0.1 \text{ mm}$$

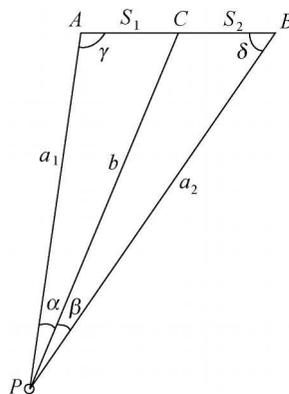


图 3 后方交会

6) 再使用两台经纬仪分别对各标靶靶心的水平角、垂直角进行测量, 用前方交会法可得到检校点的平面坐标。具体方法如图 4所示,  $A$ 、 $B$  为已知点, 则求待定点  $P$  的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} X_p &= \frac{X_A \cot \beta + X_B \cot \alpha - (Y_B + Y_A)}{\cot \alpha + \cot \beta} \\ Y_p &= \frac{Y_A \cot \beta + Y_B \cot \alpha - (X_B + X_A)}{\cot \alpha + \cot \beta} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

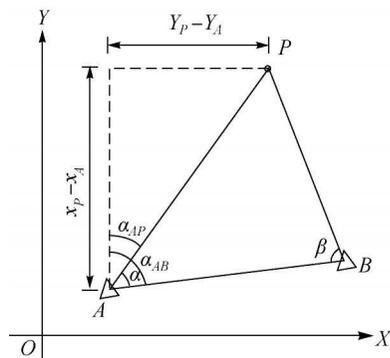


图 4 前方交会

7) 前方交会测量 P 点的平面位置中误差为

$$M_p = \pm \sqrt{\frac{m^2(a^2 + b^2)}{\rho^2 \sin^2 \gamma} + m_A^2 \left(\frac{a}{s}\right)^2 + m_B^2 \left(\frac{b}{s}\right)^2} \quad (3)$$

式中,  $s$  是测站  $A, B$  之间的距离;  $m$  是经纬仪的测角中误差 ( $\pm 2''$ );  $m_A, m_B$  ( $\pm 0.1 \text{ mm}$ ) 是测站点的中误差;  $\gamma$  是交会角 (一般应大于  $30^\circ$  并小于  $150^\circ$ ),  $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta)$ 。若  $s = 10 \text{ m}$ ,  $a \approx b \approx s$ ,  $\gamma = 30^\circ$ , 则可由式 (3) 计算出  $P$  点的平面点位精度为

$$M_p = \pm \sqrt{2} \times \sqrt{\left(\frac{2 \times 6000}{206265 \times \sin 30^\circ}\right)^2 + (0.1 \times \frac{8}{10})^2} = \pm 0.16 \text{ mm}$$

8) 标靶的高程采用三角高程测量, 并假定  $A_1$  点的高程为高程基准。由于采取的是相对高程, 不需要量取仪器高和目标高, 故能达到很高的精度。三角高程测量的中误差为

$$m_z = \pm \sqrt{2 \tan^2 \alpha M_p^2 + \left(\frac{Sm}{\cos^2 \alpha \rho}\right)^2}$$

式中, 平距  $S$  可以根据平面坐标计算。若  $m = \pm 4''$ ,  $\alpha = 5^\circ$ ,  $S = 15 \text{ m}$ , 则高程的中误差为

$$m_z = \pm 0.1 \text{ mm}$$

综上所述, 本试验建立的检校场平面精度为  $\pm 0.16 \text{ mm}$ , 高程精度为  $\pm 0.1 \text{ mm}$ , 所测标靶的点位精度大大优于  $\pm 1 \text{ mm}$ , 符合设计要求, 可以视为真值。

### 三、扫描坐标的转换

使用 ScanStation2 型地面三维激光扫描仪分别对约 40 m、80 m 处所设置的标靶扫描, 用专业软件 Cyclone 6 对坐标进行提取, 分别记为  $b_i(x, y, z)$  和  $c_i(x, y, z)$ , ( $i = 1, 2, \dots, 18$ )。由于扫描仪使用的坐标系是仪器内部自定义的坐标系, 提取出来的扫描坐标无法与测量坐标进行直接对比, 因此需要对其进行坐标转换, 即转换  $P_1 \rightarrow P_2$

$$P_2 = RP_1 + T \quad (4)$$

即

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $P_1 = (X, Y, Z)^T$ , 为控制网内的标靶坐标;  $P_2 = (x, y, z)^T$ , 为扫描仪内部坐标系中的标靶坐标;  $R =$

$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$ , 为两坐标系之间的旋转矩阵, 由参

数  $\phi, \omega, \theta$  (即两坐标系之间的旋转角度) 确定;  $T = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ , 为平移矩阵, 就是扫描仪内部坐标系

原点在控制网坐标系中的坐标。解算  $R, T$  的过程实质上就是解算  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \phi, \omega, \theta$  6 个参数的过程。

坐标转换的方法是: 选出 3 个标靶的两套坐标作为控制点, 根据式 (4), 利用最小二乘法计算出扫描仪坐标系转换到控制网坐标系的转换参数  $R$  和  $T$ , 则其余的标靶坐标就可由求出的转换参数  $R, T$  全部转换到控制网坐标系中, 从而得到转换后的坐标, 记为  $B_i(x, y, z), C_i(x, y, z)$  ( $i = 1, 2, \dots, 18$ )。

### 四、坐标精度分析及评定

用常规测量方法得到 18 个标靶的坐标值后, 选择 1 号、11 号、18 号 3 个标靶的两套坐标作为控制点, 将扫描仪获得的标靶坐标进行转换, 得到扫描坐标。通过分析, 比较  $A_i$  与  $B_i, C_i$  的差值, 得出坐标真误差 (如表 2 所示)。

表 2 坐标差 mm

标靶	坐标差		
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
$B_2$	+3.8	+2.2	-3.1
$B_3$	+4.2	-1.6	+2.5
$B_4$	+3.3	-1.9	-3.5
$B_5$	+2.9	+2.1	+2.9
$B_6$	-2.7	+3.3	+3.2
$B_7$	+2.5	-2.4	-2.8
$B_8$	+3.4	+0.9	+4.2
$B_9$	+2.6	-1.7	-3.6
$B_{10}$	-3.5	-0.8	+1.6
$B_{12}$	-5.2	+3.2	-1.8
$B_{13}$	+1.8	+0.6	+2.1
$B_{14}$	+1.5	-1.2	-1.9
$B_{15}$	+1.4	+2.3	-2.6
$B_{16}$	+2.3	-2.3	+1.5
$B_{17}$	-2.6	+3.7	-2.4
$C_2$	-3.8	-4.7	+2.6
$C_3$	+5.2	-1.8	-3.5
$C_4$	-4.6	+3.2	-5.2
$C_5$	+2.6	+4.6	+2.8
$C_6$	-2.8	-2.2	+3.5
$C_7$	+3.1	+5.3	+4.4
$C_8$	-5.9	-1.3	+4.3
$C_9$	-3.6	+3.7	-2.6
$C_{10}$	+2.5	-2.9	+3.8
* $C_{12}$	扫描仪未识别		
$C_{13}$	-4.1	+2.6	+3.4
$C_{14}$	+3.5	-3.5	+3.8
* $C_{15}$	扫描仪未识别		
$C_{16}$	+3.3	+2.9	-3.3
$C_{17}$	-3.8	-3.2	+2.9

根据点位中误差公式

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n}} \\ \sigma_y &= \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2}{n}} \\ \sigma_z &= \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i^2}{n}} \\ \sigma_p^2 &= \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

可得到在距离为 40 m 和 80 m 时扫描仪的点位精度(如表 3 所示)。

表 3 点位精度 mm

距离 /m	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_p$
40	±3.1	±2.2	±2.8	±4.7
80	±3.9	±3.4	±3.6	±6.3

由以上分析可知,在实际测量环境下 ScanStation2 型扫描仪的点位精度,在距离为 40 m 时为 ±4.7 mm,符合厂家给出的 ±6 mm/50 m 的精度指标;在距离为 80 m 时为 ±6.3 mm,这也符合大部分建筑物建模的精度要求。

## 五、结束语

通过对 ScanStation2 地面三维激光扫描仪进行

的实地测试和精度评定,表明在实际工作环境中该仪器达到了厂家所提供的精度指标。同时,研究结论可为诸如矿区下沉、盆地监测、公路与桥梁测量、土石方工程等特殊测绘工作提供一定的经验和借鉴。

## 参考文献:

- [1] 丁延辉. 地面三维激光数据配准研究 [J]. 测绘通报, 2009(2): 57-59
- [2] 朱凌. 地面三维激光扫描标靶研究 [J]. 激光杂志, 2008 29(1): 33-35
- [3] 官兰云. 地面三维激光扫描数据处理中的若干问题研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008
- [4] 冯文灏. 非地形摄影测量 [M]. 北京: 测绘出版社, 1985
- [5] 鲁铁定, 周世健, 张立亭, 等. 基于整体最小二乘的地面激光扫描标靶球定位方法 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(4): 102-105
- [6] 施贵刚, 程效军, 官云兰, 等. 地面三维激光扫描点云配准的最佳距离 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2009 30(2): 197-200
- [7] 韩光瞬, 冯仲科, 刘永霞, 等. 三维激光扫描系统测树原理及精度分析 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(12): 187-190
- [8] 何文峰. 大型场景三维重建中的深度图像配准 [D]. 北京: 北京大学, 2004
- [9] 郑德华, 沈云中, 刘春. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析 [J]. 测绘工程, 2005, 14(2): 32-34

(上接第 3 页)

种方法对任何情况下的周跳都可以快速准确地探测出来。

另外,多频伪距载波相位组合法的探测精度主要取决于采样率大小、载波相位波长大小以及噪声误差大小;而 MW & Geometry-free 组合法在消除了星地距离的同时,也消除了与频率无关的误差项,它是几何无关组合,可以应用于静态和动态的数据处理中,但由于其组合系数为小数,在求解周跳值进行精度取舍时可能会有一定的影响。

## 参考文献:

- [1] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2003

- [2] 王国富, 朱建军. 具有随机观测矩阵的线性系统的 Kalman 滤波 [J]. 测绘通报, 2004(3): 18-20
- [3] 刘旭春, 伍岳, 黄学斌, 等. 多频组合数据在原始载波观测值预处理中的应用 [J]. 测绘通报, 2007(2): 14-17
- [4] 范建军, 王飞雪, 郭桂蓉. GPS 三频非差观测数据周跳的自动探测与改正研究 [J]. 测绘科学, 2006 31(5): 24-26
- [5] 韩绍伟. GPS 组合观测值理论及应用 [J]. 测绘学报, 1995 24(2): 8-13
- [6] BISNATH B. Efficient Automated Cycle-slip Correction of Dual frequency Kinematics GPS Data [C] // Proceeding of the 4th Annual Conference of the Canadian Aeronautics and Space Institute [S. l.]: The Canadian Aeronautics and Space Institute, 2000