

# 三维激光扫描精度评定及控制方法研究

杨敏, 方林, 李承铭

华东建筑设计研究院有限公司, 上海

收稿日期: 2023年9月26日; 录用日期: 2023年12月30日; 发布日期: 2024年1月5日

## 摘要

针对三维激光扫描成果无可靠精度评定方法的空白, 本文首先对三维扫描精度评定现状进行了探讨, 提出了采用控制测量与三维激光扫描结合的方法, 以此对点云成果的精度进行评定。以水泥库测绘项目为例, 详细介绍了两种技术结合的主要作业流程, 通过控制点融合将点云成果的精度评定为水平平均中误差为3.8 mm, 高程平均中误差为0.082 mm。同时, 提出了一种以高精度全站仪单测站点位来控制三维扫描整体模型精度的方法, 在水泥库测绘项目中进行测试论证, 结果表明, 该方法具有一定的控制作用。

## 关键词

三维扫描, 控制测量, 精度

# Research on Evaluation and Control Method of 3D Laser Scanning Accuracy

Min Yang, Lin Fang, Chengming Li

East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai

Received: Sep. 26<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 30<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 5<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this paper, in view of the lack of reliable accuracy evaluation methods for 3D laser scanning results, the current situation of 3D scanning accuracy evaluation is discussed first, and a method combining control measurement and 3D laser scanning is proposed to evaluate the accuracy of point cloud results. Taking the cement warehouse mapping project as an example, the main operation flow combining the two technologies is introduced in detail. Through the fusion of control points, the accuracy of point cloud results was assessed as the mean horizontal error of 3.8 mm and the mean elevation error of 0.082 mm. At the same time, a method of controlling the accuracy of the 3D scan-

ning model by using a high-precision total station to measure a single station position is proposed. The test results show that the method has a certain control effect in the project of cement warehouse mapping.

## Keywords

3D Scanning, Control Survey, Accuracy

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

三维激光扫描技术是近年来兴起的新技术，它是利用激光测距的原理，通过记录被测物体表面大量密集点的三维坐标、反射率和纹理等信息，可快速复建出被测目标的三维模型及线、面、体等各种图件数据。由于三维激光扫描系统可以密集地大量获取目标对象的数据点，因此相对于传统的单点测量，三维激光扫描技术也被称为从单点测量进化到面测量的革命性技术突破。近年来，随着三维激光扫描技术应用的不断发展和探索，该测绘技术已经在各个领域得到广泛应用[1]，并在一些重大工程项目中起到关键性作用。

三维激光扫描技术应用扩展的同时，也浮现出一些典型问题，如在项目汇报中成果的精度往往会被提及，但实际可能连技术人员本身都无法给出一个合理的确切数值，软件中存在的误差分析环节仅仅是对拼接站之间的误差评定，因此如何对点云成果的精度进行准确评定显得尤为突出和必要。

在建设工程领域，按照测量任务所要求的精度，测定一系列控制点的平面位置和高程，建立起工程测量控制网，控制网具有控制全局、限制测量误差累积的作用。本文将结合实际项目为例，详细阐述将三维激光扫描与控制测量技术结合，作为评定三维激光扫描成果精度的方法，同时提出一种简化的精度控制方法，为后续的技术应用及研究提供参考和借鉴。

## 2. 三维激光扫描精度评定现状

三维激光扫描仪单测站精度评定时，主要考虑的是仪器的标称参数，表现为测距精度和测角精度。在不考虑偶然误差的前提下，扫描精度与目标距离、角度息息相关，而点位精度是测距精度及测角精度的综合反映。由于点位精度的真值难以进行复核确认，因此目前计量院方面主要对三维激光扫描仪的测距精度进行试验校准。

三维激光扫描的测距精度标识和传统全站仪等测量仪器进行了统一，即测距精度表达式为 $(A + B\text{ppm} \times D)$  mm，其中 A 代表仪器的固定误差，代表不管测量的实际距离多远，测量仪器都将存在不大于该值的固定误差； $B\text{ppm} \times D$  公里代表比例误差，其中 B 是比例误差系数，随着实际测量距离的变化，仪器的比例误差部分也按比例发生变化。需要注意的是，标称测距精度并不是实际测距精度，而是中误差极限的概念，可以理解为仪器的测距误差不会超过这个标称测距精度值。

将几种主流的 Leica 三维激光扫描仪和全站仪的标称精度参数进行汇总，见表 1 所示，可以看出，目前三维激光扫描仪的测距精度在数百米范围内基本可以达到全站仪的水平，但在测角精度上有较大的差距。

**Table 1.** Nominal accuracy of scanner and total station**表 1.** 扫描仪及全站仪的标称精度

设备类型	三维激光扫描仪	
扫描仪型号	Lecia RTC360	Lecia P40
测量范围(m)	0.3~130 m	0.4~270 m
测距精度	1 mm + 10 ppm	1.2mm + 10 ppm
测角精度	18"	8"
设备类型	全站仪	
扫描仪型号	Lecia TS16	Lecia TS60
测量范围(m)	1.5~3500 m	1.5~3500m
测距精度	2 mm + 2 ppm	0.6 mm + 1 ppm
测角精度	1"	0.5"

三维激光扫描的多测站精度评定时，目前没有一个可靠的方法，基于软件的误差报告仅仅表达测站间的拼接误差，无法反映整体数据模型真实的测量精度。

### 3. 三维激光扫描与控制测量结合

针对多测站点云成果精度无可靠评定的空白，利用控制测量可以合理分配误差并评定精度的技术特点，将三维激光扫描与控制测量结合，使三维扫描成果能够有一个准确、合理的精度评定。在建筑测绘项目中，通过全站仪根据场地地形及既定目标制作适配的导线，同时采用水准仪进行高程控制测量，形成高精度平面、高程控制网；将导线控制点布设在每一个扫描测站之中，导入控制点坐标对点云数据进行纠偏和调整，继而以导线的精度来评估三维扫描成果的精度。三维激光扫描与控制测量结合的主要流程如图 1 所示。

#### 3.1. 案例概况

水泥库(八连筒)位于浦东水泥厂厂区东北侧，设计于 1983 年，东西向总长约为 51 m，南北向总宽约为 21 m，总建筑面积约为 1250 m<sup>2</sup>，主体由筒仓和提升机房两部分组成，设有变形缝，目前提升机房已被拆除。水泥库采用钢筋混凝土筒仓结构，由 2 排 4 列，共 8 个内径为 10 m 的标准单仓组成，壁厚为 200 mm，仓下高度为 4.5 m，仓体高度为 25 m。建筑原作为水泥存储及运输用房使用，近期业主拟对其进行改造[2]。水泥库外景如图 2 所示。

本次改造设计采用清水混凝土内墙面，因此涉及清水混凝土的模板施工问题，由于水泥库整体墙面为弧形，对模板的精度有了更高的要求，考虑到建筑物筒仓壁本身存在分段式的倾斜偏差，专家认为需要在施工前对筒仓各部位的倾斜现状有一个准确的评估，进行适当的先期处理，以此避免施工后由于偏差导致的模板返工及工期延误；设计方则提出希望得到一个精度可以达到 10 mm 以内的整体数据模型供方案调整使用。根据上述要求，采用 Lecia RTC360 型三维激光扫描对水泥库进行整体三维数据采集，规划闭合导线并布置相应控制点，采用 Lecia TS16 型全站仪和 Trimble DiNi03 型水准仪分别对平面及高程进行控制测量，将控制点导入点云数据中进行整体纠偏，最终实行对水泥库点云成果的精度控制和评定。

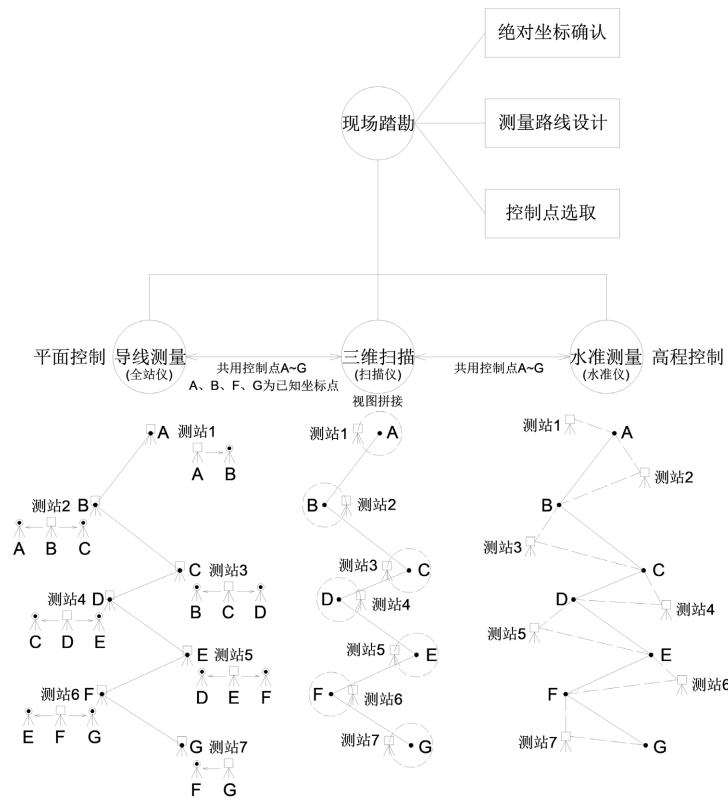


Figure 1. Main flow diagram  
图 1. 主要流程示意图

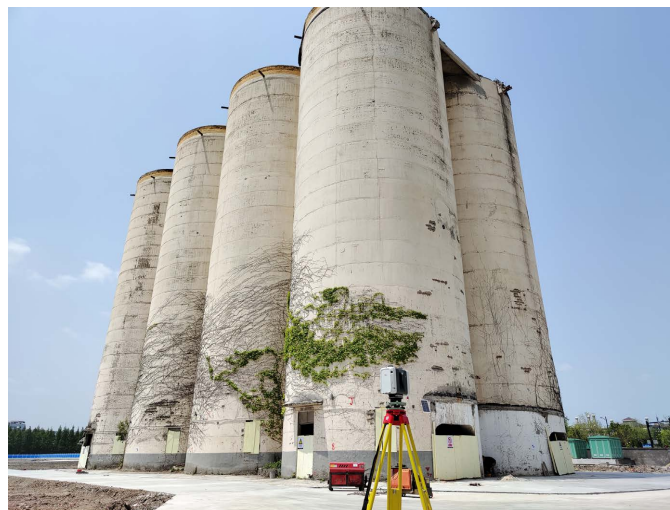


Figure 2. Exterior of the cement warehouse  
图 2. 水泥库外景

### 3.2. 现场作业

#### 1) 现场踏勘

由于水泥库周边场地较为开阔，因此确定采用闭合导线。现场已知 A、B 2 个绝对坐标，设计一个连续折线的大致走向，基于两点间通视良好，点位分布均匀的原则，结合三维激光扫描测站范围和针对水

泥库上部数据采集的仰角需要, 选择出合适的控制点位, 控制点采用三维激光扫描软件可以自动识别的黑白标靶进行地面固定。控制点布置方案如图 3 所示。

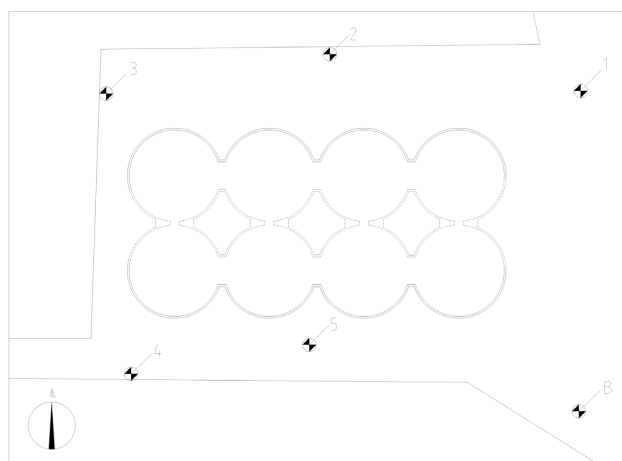


Figure 3. Control point layout scheme

图 3. 控制点布置方案

## 2) 导线测量及水准测量

导线测量采用全站仪按测回法进行转折角和导线边长的观测, 导线与绝对坐标(已知点)连接时, 需要测出各连接角, 本次观测主要采用三联脚架法; 水准测量与导线测量共用控制点, 采用电子水准仪和条码式钢钢尺, 从绝对坐标(已知点)出发, 沿路线对控制点进行水准测量, 最后回到原来的已知水准点上, 形成闭合环线。

## 3) 三维激光扫描数据采集

三维激光扫描现场扫描前, 首先要确定后续拼接的方式, 由于最后的数据都要通过控制点进行纠偏, 因此拟定采用现场作业较为方便的视图拼接方式, 即两测站之间有足够重合率即可。根据已知点和控制点的个数在现场架设 6 个测站, 保证每一个测站都需要扫描到一个控制点, 为确保软件后续对标靶有足够的识别度, 因此把每一个测站均布置在控制点的附近, 按照导线的路径结合控制点的位置将所有的数据采集完成。扫描测站位置如图 4 所示。



Figure 4. Scan station position

图 4. 扫描测站位置

### 3.3. 数据处理

将导线测量数据导入平差软件中进行计算[3]，导线路径为：A-B-5-4-3-2-1-B-A，总边长为 169.591 m，平均边长为 28.265 m，全长相对闭合差  $k = 1/105,008$ ，限差 =  $1/55,000$ ，因此导线测量结果满足要求。由计算结果可知：控制点的最大点位中误差为 3.8 mm，最小点位中误差为 2.3 mm，平均点位中误差为 3.1 mm。将水准测量数据导入平差软件中进行计算，水准路径为 2-1-B-5-4-3，总长度为 140 m，高差闭合差为 -0.19 mm，限差为 1.28 mm，因此水准测量结果满足要求。由计算结果可知：控制点的最大高程中误差为 0.09 mm，最小高程中误差为 0.07 mm，平均高程中误差为 0.082 mm。控制点成果汇总详见表 2。

**Table 2.** Control point results summary

**表 2.** 控制点成果汇总

点名	X (m) Y (m)	H (m)	平面/高程点位中误差 (mm)
A (已知)	-4586.5450 14264.9530	4.400	/
B (已知)	-4534.5420 14231.5400	3.683	/
1	-4502.4984 14217.0096	3.710	2.3/0.07
2	-4510.2361 14190.0577	3.682	3.5/0.09
3	-4524.5868 14169.6212	3.617	3.8/0.09
4	-4551.4023 14184.9446	3.641	3.2/0.09
5	-4540.3411 14201.4612	3.719	2.7/0.07

将三维扫描数据导入 cyclone 软件后，在单测站内对控制点标靶进行自动识别及命名[4]，随后进行视图拼接，去噪后得到整体三维点云模型，如图 5 所示。将平面及高程控制点坐标进行整理汇总，编写入 txt 文件，将坐标名称与标靶控制点名称进行统一，将坐标文本和点云数据同时导入，其中以坐标文本为基站，进行数据融合，得到由控制点纠偏后的点云数据模型，点云成果经复核后确认与控制点坐标一致，因此以导线和水准测量的精度对三维扫描数据进行评定，即平面上的平均点位中误差为 3.1 mm，高程上的平均点位中误差为 0.082 mm。

### 4. 一种简化的精度控制方法

在既有建筑测绘项目中，由于主要的目标对象是建筑物而不是地形，且不涉及新建的项目大都没有完整的图纸资料[5]，往往无法获得绝对坐标，同时由于场地和环境条件的限制，使得导线的布设工作难以实施，在上述没有条件进行控制测量的情况下，三维激光扫描的成果精度难以得到有效的控制和保障。

全站仪是目前工程领域应用最广泛的测量仪器，它是集水平角、垂直角、距离、高差测量功能于一体的测绘系统，随着科学技术的不断发展，目前的全站仪已经可以达到极高的角度和距离测量精度，例

如徕卡 TS60，其测角精度达到了  $0.5''$ ，测距精度达到了  $0.6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ ，可使用在精密工程测量、变形监测以及几乎无容许限差的机械引导控制等应用领域。因此，可以确定的是，采用高精度全站仪在单测站测量的点位坐标具有较高的点位精度。



Figure 5. 3D point cloud model

图 5. 三维点云模型

基于上述理论，提出一种三维激光扫描简化的精度控制方法，主要思路是通过高精度全站仪单测站采集的标靶坐标数据与三维激光扫描的点云模型进行拼接，来对三维扫描的整体点云模型进行纠偏控制。如图 6 所示，根据目标建筑物拟布置 4 个三维扫描测站，首先将测站的位置确定下来，在每一个测站周边放置配对的标靶点，综合考虑四个标靶的位置选择一个全站仪单测站可以同时采集到上述标靶的位置，继而进行坐标采集。随后在三维扫描测站扫描时，分别在各测站采用高分辨率扫描配对的标靶点。在数据后处理中，类似三维扫描与控制测量结合的数据处理方法，将单测站采集的标靶点位坐标导入三维扫描点云模型的标靶进行纠偏，以此达到精度控制的作用。

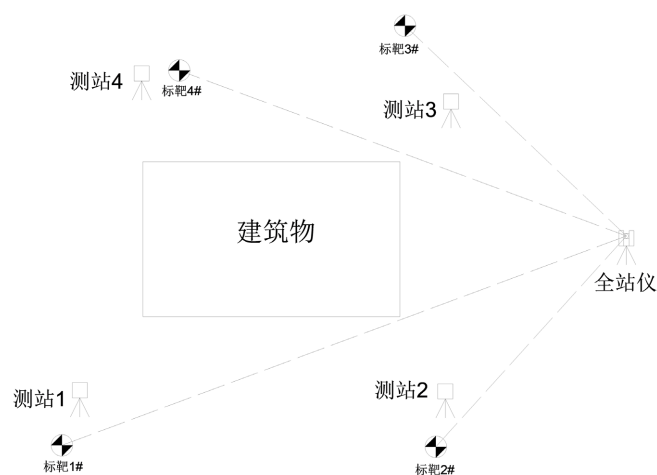


Figure 6. Accuracy control method diagram

图 6. 精度控制方法示意图

以水泥库项目为例进行测试，在现场测量时增加测试标靶点 cs-1~6，使用 Leica TS16 型全站仪( $2 \text{ mm} +$

2 ppm, 1''), 从已知点 B 点引出, 在建筑物西侧布置测站, 如图 7 所示, 采集标靶 kz-1~3 作为单测站控制点, 将扫描测站中包含上述三个点位数据的测站进行拼接, 得到整体点云数据模型, 把场景中的其余标靶坐标摘取出来, 与上述控制测量结合的点云成果中的坐标对应进行比对, 详见表 3 所示, 由比对结果可知: 六个测试点位的 X 向偏差在 2~5 mm, Y 向偏差均为 0 mm, H 向偏差在 2~7 mm, 整体偏差较小, 因此认为具有一定的精度控制作用。需要注意的是, 由于全站仪单测站的测量范围有限, 该方法只适用于小区域的三维测绘项目, 且无法对扫描成果进行精度评定。

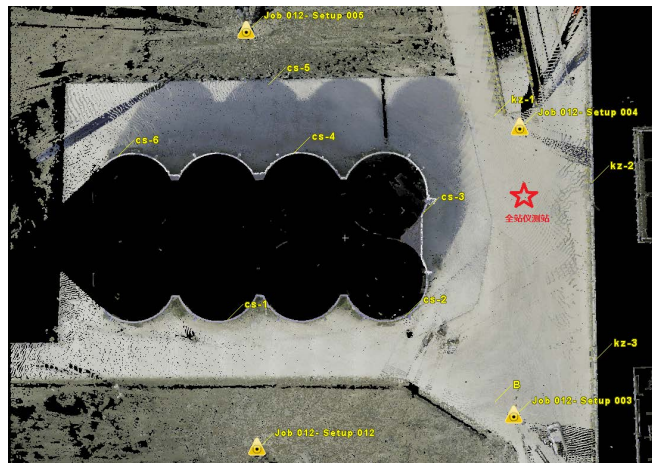


Figure 7. Location of station and target  
图 7. 测站及标靶布置位置

Table 3. Single station control measurement point comparison  
表 3. 单测站控制测点比对

点名	X (m)	Y (m)	H (m)	X/Y/H 向偏差(mm)
cs-1	-4538.987	14197.172	5.339	
cs-1 (控制测量)	-4538.989	14197.172	5.332	2/0/7
cs-2	-4529.436	14217.130	5.106	
cs-2 (控制测量)	-4529.438	14217.130	5.103	3/0/3
cs-3	-4517.015	14213.941	5.390	
cs-3 (控制测量)	-4517.017	14213.941	5.387	2/0/3
cs-4	-4516.732	14196.316	6.427	
cs-4 (控制测量)	-4516.734	14196.316	6.423	2/0/4
cs-5	-4510.231	14190.057	3.684	
cs-5 (控制测量)	-4510.236	14190.057	3.682	5/0/2
cs-6	-4525.960	14176.596	5.758	
cs-6 (控制测量)	-4525.963	14176.596	5.754	3/0/4

## 5. 结论

1) 提出了控制测量与三维激光扫描技术结合的方法, 以水泥库实际项目为例, 对主要作业流程进行



详细介绍, 最终将点云成果的精度评定为平面上的平均点位中误差为 3.1 mm, 高程上的平均点位中误差为 0.082 mm, 方法同时兼顾了精度评定和控制的双重作用。

2) 提出了一种简化的精度控制方法, 基于高精度全站仪单测站测量的坐标具有较高的点位精度, 以单测站扫描的标靶点位坐标对三维点云模型进行纠偏, 以此来控制三维扫描点云整体模型的成果精度, 同样以水泥库项目为例进行与控制测量结果的测试比对, 结果显示, 六个测试点位的 X 向偏差在 2~5 mm, Y 向偏差均为 0 mm, H 向偏差在 2~7 mm, 整体偏差较小, 表明该方法具有一定的精度控制作用, 但受限于全站仪的单测站场景测量范围, 因此具有局限性。

## 参考文献

- [1] 杨敏. 上海里弄建筑甄别中的三维测绘技术应用[J]. 住宅科技, 2022, 42(12): 61-64.
- [2] 杨敏, 方林, 官尧超, 祝昊昊, 张俊. 工业厂区检测改造中的三维测绘技术应用——以上海浦东水泥厂为例[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 1889-1892.
- [3] 向东. 导线网平差的程序设计与实现[J]. 科技展望, 2015, 25(10): 124-125.
- [4] 陆道渊, 黄良, 唐波, 卢旦, 李承铭. 三维激光扫描技术在世茂深坑酒店基础设计中的应用[J]. 结构工程师, 2016, 32(2): 159-164.
- [5] 龚靖. 房产测绘档案信息化管理的思考[J]. 住宅科技, 2013, 33(7): 57-60.