



T/CECS XXX-2023

中国工程建设标准化协会标准

基于激光三维扫描的建筑检测技术标准

Technical standard for building inspection technology based on laser three
dimensional scanning

(征求意见稿)

中国 XX 出版社

中国工程建设标准化协会标准

基于激光三维扫描的建筑检测技术标准

Technical standard for building inspection technology based on laser three
dimensional scanning

T/CECS XXX-2023

主编单位：重庆大学建筑规划设计研究总院有限公司

中建科技集团有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X 年 X 月 X 日

中国 XX 出版社

20XX 北京

前 言

《基于激光三维扫描的建筑检测技术标准》（以下简称“规程”）是根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2020 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2020]14 号）的要求进行编制。编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，采纳最新试验成果，参考国内外相关标准，在广泛征求意见基础上，制定本规程。

本规程共分 9 章，主要包括：总则，术语和符号，基本规定，点云数据，数据处理，预制构件尺寸检测，房屋现场尺寸检测，竣工数字可视化模型，成果归档。

本规程由中国工程建设标准化协会建筑产业化分会归口管理，由重庆大学建筑规划设计研究总院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给解释单位（地址：重庆市沙坪坝区沙北街 83 号第二综合楼 1504 室，邮编：400045，邮箱：liujp@cqu.edu.cn）。

主 编 单 位：重庆大学建筑规划设计研究总院有限公司

中建科技集团有限公司

参 编 单 位：重庆大学

重庆智能建造研究院有限公司

深圳市无穹创新科技有限公司

中建八局第一建设有限公司

中国五冶集团有限公司

成都建工第一建筑工程有限公司

主要起草人：刘界鹏 李东声 周绪红 樊则森 齐宏拓

廖 岳 马晓晓 曾 焱 李明春 熊 刚

翟 影 王 曦 甘庆峰 潘 杰 陈 江

亓祥成 周 敬 侯新宝 曹 谦 陈 波

主要审查人：XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX

XXXX XXXX

目 次

1	总则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(4)
3	基本规定	(6)
4	点云数据	(7)
4.1	基本几何属性	(7)
4.2	数据质量	(11)
5	数据处理	(12)
5.1	一般规定	(12)
5.2	处理流程	(12)
5.3	点云配准	(12)
5.4	点云降噪与轻量化	(14)
5.5	成果整理	(17)
6	预制构件尺寸检测	(18)
6.1	一般规定	(18)
6.2	混凝土构件检测	(18)
6.3	钢构件检测	(19)
7	房屋现场尺寸检测	(21)
7.1	一般规定	(21)
7.2	平面平整度检测	(23)
7.3	墙面垂直度检测	(24)
7.4	施工尺寸偏差检测	(25)
7.5	结构变形监测	(26)
7.6	机电管线及预埋预留检测	(27)
8	竣工数字可视化模型	(29)
8.1	精细度级别定义	(29)

8.2 模型三维重建	(29)
9 成果归档	(31)
9.1 一般规定	(31)
9.2 归档内容	(31)
用词说明	(32)
主要引用标准名录	(33)
条文说明	(34)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
	2.1 Terms	(2)
	2.2 Symbols	(4)
3	General requirements	(6)
4	Point cloud data	(7)
	4.1 Basic geometric attributes	(7)
	4.2 Data quality	(11)
5	Data process	(12)
	5.1 General	(12)
	5.2 Processing flow	(12)
	5.3 Point cloud registration	(12)
	5.4 Point cloud denosing and simplification	(14)
	5.5 Result management	(17)
6	Dimensional inspection of prefabricated components	(18)
	6.1 General	(18)
	6.2 Dimensional inspection of concrete components	(18)
	6.3 Dimensional inspection of steel components	(19)
7	Dimensional inspection of building sites	(21)
	7.1 General	(21)
	7.2 Flatness inspection of planes	(23)
	7.3 Verticality inspection of walls	(24)
	7.4 Inspection of construction dimensional deviations	(25)
	7.5 Structural deformation monitoring	(26)
	7.6 Inspection of MEP and embedded parts	(27)
8	As-built digital visualization models	(29)
	8.1 Definition of level of detail	(29)

8.2 Three dimensional reconstruction of models	(29)
9 Archiving results	(31)
9.1 General	(31)
9.2 Archived content	(31)
Explanation of wording	(32)
List of quoted standards	(33)
Addition: Explanation of provisions	(34)

1 总则

1.0.1 为规范基于点云数据的建筑尺寸数字化检测的工程应用，做到技术先进、安全适用、经济合理、质量可靠，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于基于点云数据的混凝土、钢结构等预制构件及一般工业和民用建筑的尺寸数字化检测。

1.0.3 基于点云数据进行建筑尺寸数字化检测除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 点云数据 point cloud data

以离散形式分布在三维空间中的点的集合,简称点云,可通过三维激光扫描、多视角图像生成等技术获取。

2.1.2 最近邻点间距 distance between nearest neighbor points

点云中某个点与其最近点的距离。

2.1.3 点云密度 point cloud density

单位面积内的平均点云数量。

2.1.4 点云精度 point cloud accuracy

点云测量值与真实测量值之间的接近程度。

2.1.5 平面检查点 check point in panel

用于平面误差检校,具有真实坐标的点。

2.1.6 平面检查点对 check point pair in panel

由位于同一平面的两个平面检查点组成的点对。

2.1.7 点云平面精度 point cloud panel accuracy

点云平面位置与平面真实位置之间的误差。

2.1.8 最大平面误差 max panel error

点云平面位置与平面真实位置之间的最大误差。

2.1.9 平面中误差 root mean square panel error

点云平面位置与平面真实位置之间的均方根误差。

2.1.10 相对平面中误差 relative root mean square panel error

点云平面内两点间距与其真实距离之间的均方根误差。

2.1.11 特征点 feature point

从点云中采用特定的规则或算法提取出的具有几何或其他特性的点。

2.1.12 点云配准 point cloud registration

将不同扫描站点获取的独立坐标系下的点云转换到统一坐标系中的过程。

2.1.13 点云降噪 point cloud denoising

将点云中受光线、材质、振动及仪器等因素影响所造成的离群点去除的过程。

2.1.14 点云轻量化 point cloud simplification

删减点云中的点的过程，但删减后的点云应尽量均匀且保留特征点。

2.1.15 三维逆向建模 three-dimensional reverse modeling

基于实物获取的点云和实际设计施工资料等信息表达建筑设施的对象语义、空间位置、几何形态和纹理特征的建模过程。

2.1.16 精细度 level of detail (LOD)

模型对象语义、空间位置、几何形态和纹理特征的详细程度。

2.1.17 机电管线 Mechanical, electrical, and plumbing (MEP)

建筑设计和建造中的机械、电气和管路系统。

2.1.18 模拟靠尺 simulated ruler

采用点云检测时模拟人工检测采用的靠尺，是一种虚拟靠尺。

2.1.19 检测点 inspection point

进行尺寸检测任务时在构部件或建筑表面选取的抽样位置点。

2.1.20 检测值 inspection value

在检测点处进行尺寸检测得到的尺寸或偏差值。

2.2 符号

2.2.1 基本符号说明：

d_{mean}	——	平均点间距；
d_{max}	——	最大点间距；
ρ	——	点云密度；
d_{Pmax}	——	最大平面误差；
d_{Prmse}	——	平面中误差；
d_{σ}	——	相对平面中误差；
$T(n)$	——	时间复杂度；
$O(\cdot)$	——	渐近上界；
$f(n)$	——	算法关于 n 所执行次数；
$S(n)$	——	空间复杂度；
$Overlap$	——	点云配准适应度；
N_{O}	——	重叠区域中最近点对数；
N_{T}	——	目标点云点数；
d_{Ormse}	——	内点均方根距离；
$d_{\text{Srmse}}(P_{\text{S}}, P_{\text{T}})$	——	原始点云 P_{S} 和处理后点云 P_{T} 的对称均方根距离；
$d_{\text{rmse}}(A, B)$	——	点云 A 和点云 B 的均方根距离；
P_{S}	——	原始点云；
P_{T}	——	处理后点云；
$PSNR_{\text{g}}$	——	几何信息峰值信噪比；
P_{max}	——	原始点云 P_{S} 最大包围盒的最大宽度；

SNR_a —— 属性信息峰值信噪比；

e_{sym} —— 属性信息峰值；

p —— 属性峰值；

3 基本规定

3.0.1 采用点云进行建筑尺寸数字化检测时应考虑效率、精度、实用、经济等方面。

3.0.2 用于建筑尺寸数字化检测的点云应至少包含空间三维坐标信息，根据项目需求可增加颜色、阵列、法向量等其他信息。

3.0.3 基于点云的建筑尺寸检测时，除应提供检测报告外，还应提供原始扫描点云与重要处理过程点云。

3.0.4 点云可通过三维激光扫描、多视角图像合成、结构光扫描等技术获得；用于建筑尺寸检测的点云采集设备应符合相应的现行仪器测量精度评估标准的规定。

3.0.5 检测项目宜按照完整项目、项目点云、单站扫描点云的名目由上至下分层级存储管理，应采取措施保证信息安全。

3.0.6 点云的描述应包含工程名、日期、对象编号、检测人员姓名等具体有关信息，其中日期应采用公元纪年，时间应采用北京时间。完整项目应包含所有检测项目的点云信息描述。

3.0.7 基于点云的建筑尺寸数字化检测应按照检测对象类型划分，按照检验批、分项工程、分部（子分部）工程分别进行检测。分部（子分部）工程的分项工程划分应按照现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB50300 的规定执行。

3.0.8 基于点云获得的竣工数字可视化模型应具有可扩展性。

4 点云数据

4.1 基本几何属性

4.1.1 点云中某个点的最近邻点间距按下式计算：

$$d_i = \|p_i - p'_i\|_2 \quad (4.1.1-1)$$

式中： d_i ——点云中第 i 个点的最近邻点间距，单位为米（m）， $i=1,2,\cdots,N$ ；

p_i ——点云中第 i 个点的坐标值， $i=1,2,\cdots,N$ ；

p'_i ——点云中第 i 个点的最近点的坐标值， $i=1,2,\cdots,N$ ；

N ——点云中点的总数，单位为个；

$\|\cdot\|_2$ ——二范数。

1. 平均点间距

平均点间距是点云中所有点的最近邻点间距的平均值，按下式计算：

$$d_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad (4.1.1-2)$$

式中： d_{mean} ——平均点间距，单位为米（m）；

d_i ——点云中第 i 个点的最近邻点间距，单位为米（m）， $i=1,2,\cdots,N$ ；

N ——点云中点的总数，单位为个。

2. 最大点间距

最大点间距是点云中所有点的最近邻点间距的最大值，按下式计算：

$$d_{\text{max}} = \max(d_i), i=1,2,\dots,N \quad (4.1.1-3)$$

式中： d_{max} ——最大点间距，单位为米（m）；

d_i ——点云中第 i 个点的最近邻点间距，单位为米（m）， $i=1,2,\cdots,N$ ；

N ——点云中点的总数，单位为个。

4.1.2 点云密度按下式计算：

$$\rho = \frac{N}{S} \quad (4.1.2-1)$$

式中： ρ ——点云密度，单位为个每平方米（个/m²）；

N ——点云中点的总数，单位为个；

S ——点云覆盖区域的面积，单位为平方米（m²）。

4.1.3 点云平面精度可采用最大平面误差、平面中误差或相对平面中误差进行评价。最大平面误差、平面中误差及相对平面中误差越小，点云平面精度越高。

1. 最大平面误差

最大平面误差应通过平面检查点的坐标进行计算。平面检查点应选取位于裸露平坦的平面上的点。平面检查点应分布均匀、位置明显。平面检查点的数量应视点云密度、点云中平面的个数、工程任务等具体情况确定，每个平面上平面控制点的数量不应少于 3 个，全部平面控制点的数量不宜少于 6 个。点云在 X 方向、Y 方向和 Z 方向的最大平面误差也可反映点云平面与真实平面之间的最大误差。

最大平面误差按式(4.1.3-1)计算,X 方向上的最大平面误差按式(4.1.3-2)计算, Y 方向上的最大平面误差按式 (4.1.3-3) 计算, Z 方向上的最大平面误差按式 (4.1.3-4) 计算:

$$d_{p\max} = \max \left[\sqrt{(x_i - x_i^*)^2 + (y_i - y_i^*)^2 + (z_i - z_i^*)^2} \right] \quad (4.1.3-1)$$

$$d_{X\max} = \max \left(|x_i - x_i^*| \right) \quad (4.1.3-2)$$

$$d_{Y\max} = \max \left(|y_i - y_i^*| \right) \quad (4.1.3-3)$$

$$d_{Z\max} = \max \left(|z_i - z_i^*| \right) \quad (4.1.3-4)$$

式中: $d_{p\max}$ ——最大平面误差, 单位为米 (m) ;

x_i ——第 i 个平面检查点在 X 方向上的坐标值, 单位为米 (m) ,
 $i=1,2,\cdots, N_C$;

y_i ——第 i 个平面检查点在 Y 方向上的坐标值, 单位为米 (m) ,
 $i=1,2,\cdots, N_C$;

z_i ——第 i 个平面检查点在 Z 方向上的坐标值, 单位为米 (m) ,
 $i=1,2,\cdots, N_C$;

N_C ——平面检查点的总数, 单位为个;

x_i^* ——第 i 个平面检查点在 X 方向上的真实坐标值, 单位为米(m),
 $i=1,2,\cdots, N_C$;

y_i^* ——第 i 个平面检查点在 Y 方向上的真实坐标值, 单位为米(m),
 $i=1,2,\cdots, N_C$;

z_i^* ——第 i 个平面检查点在 Z 方向上的真实坐标值,单位为米(m),
 $i=1,2,\cdots,N_C$;

$d_{X\max}$ ——点云在 X 方向上的最大平面误差,单位为米 (m) ;

$d_{Y\max}$ ——点云在 Y 方向上的最大平面误差,单位为米 (m) ;

$d_{Z\max}$ ——点云在 Z 方向上的最大平面误差,单位为米 (m) 。

2. 平面中误差

平面中误差应通过平面检查点的坐标进行计算,平面检查点也应符合本条 1 中的规定。平面中误差按下式计算:

$$d_{\text{Pmse}} = \pm \sqrt{d_{X\text{rmse}}^2 + d_{Y\text{rmse}}^2 + d_{Z\text{rmse}}^2} \quad (4.1.3-5)$$

$$d_{X\text{rmse}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_C} (x_i - x_i^*)^2}{N_C}} \quad (4.1.3-6)$$

$$d_{Y\text{rmse}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_C} (y_i - y_i^*)^2}{N_C}} \quad (4.1.3-7)$$

$$d_{Z\text{rmse}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_C} (z_i - z_i^*)^2}{N_C}} \quad (4.1.3-8)$$

式中: d_{Pmse} ——平面中误差,单位为米 (m) ;

$d_{X\text{rmse}}$ ——点云在 X 方向上的平面中误差,单位为米 (m) ;

$d_{Y\text{rmse}}$ ——点云在 Y 方向上的平面中误差,单位为米 (m) ;

$d_{Z\text{rmse}}$ ——点云在 Z 方向上的平面中误差,单位为米 (m) ;

x_i ——第 i 个平面检查点在 X 方向上的坐标值,单位为米 (m) ,
 $i=1,2,\cdots,N_C$;

y_i ——第 i 个平面检查点在 Y 方向上的坐标值,单位为米 (m) ,
 $i=1,2,\cdots,N_C$;

z_i ——第 i 个平面检查点在 Z 方向上的坐标值,单位为米 (m) ,
 $i=1,2,\cdots,N_C$;

N_C ——平面检查点的总数,单位为个;

x_i^* ——第 i 个平面检查点在 X 方向上的真实坐标值,单位为米(m),
 $i=1,2,\cdots, N_C$;

y_i^* ——第 i 个平面检查点在 Y 方向上的真实坐标值,单位为米(m),
 $i=1,2,\cdots, N_C$;

z_i^* ——第 i 个平面检查点在 Z 方向上的真实坐标值,单位为米(m),
 $i=1,2,\cdots, N_C$ 。

3. 相对平面中误差

相对平面中误差应通过平面检查点对中两个平面检查点的间距进行计算。每对平面检查点对由位于同一平面的两个平面检查点组成,平面检查点对中每个平面检查点也应符合本条 1 的规定。平面检查点对的数量应视点云密度、点云中平面的个数、工程任务等具体情况确定,每个平面上平面控制点对的数量不应少于 3 对,全部平面控制点对的数量不宜少于 6 对。相对平面中误差按下式计算:

$$d_\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_P} (d_{ij} - d_{ij}^*)^2}{N_P}} \quad (4.1.3-9)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (4.1.3-10)$$

$$d_{ij}^* = \sqrt{(x_i^* - x_j^*)^2 + (y_i^* - y_j^*)^2 + (z_i^* - z_j^*)^2} \quad (4.1.3-11)$$

式中: d_σ ——相对平面中误差,单位为米 (m) ;

k ——平面检查点对的序号;

N_P ——平面检查点对的总对数,单位为对;

d_{ij} ——平面检查点对中平面检查点 i 和 j 之间的距离,单位为米 (m) , $i=1,2,\cdots, N_P$, $j=1,2,\cdots, N_P$;

d_{ij}^* ——平面检查点对中平面检查点 i 和 j 之间的真实距离,单位为米 (m) , $i=1,2,\cdots, N_P$, $j=1,2,\cdots, N_P$;

x_i ——第 i 个平面检查点在 X 方向上的坐标值,单位为米 (m) ,
 $i=1,2,\cdots, N_C$;

y_i ——第 i 个平面检查点在 Y 方向上的坐标值,单位为米 (m) ,
 $i=1,2,\cdots, N_C$;

z_i ——第 i 个平面检查点在 Z 方向上的坐标值，单位为米（m），
 $i=1,2,\cdots,N_C$;

N_C ——平面检查点的总数，单位为个;

x_i^* ——第 i 个平面检查点在 X 方向上的真实坐标值，单位为米（m），
 $i=1,2,\cdots,N_C$;

y_i^* ——第 i 个平面检查点在 Y 方向上的真实坐标值，单位为米（m），
 $i=1,2,\cdots,N_C$;

z_i^* ——第 i 个平面检查点在 Z 方向上的真实坐标值，单位为米（m），
 $i=1,2,\cdots,N_C$ 。

4.2 数据质量

4.2.1 点云质量分级和不同工程任务的准用点云质量应符合表 4.2.1 的规定。

表 4.2.1 点云质量分级和适用范围

点云等级	点云精度(mm)	点云密度(个/m ²)	最大点间距(mm)	适用范围			
				工程检测	工程监测	进度统计	可视化建模
I 级	≤0.02	≥4000	≤3	√	√	√	√
II 级	≤0.05	≥1000	≤10	√	√	√	√
III 级	≤10	≥500	≤25		√	√	√
IV 级	≤20	≥100	≤30				√

4.2.2 实际工程中，可根据具体任务调整准用点云质量，采用更高质量的点云。

5 数据处理

5.1 一般规定

5.1.1 点云宜采用算法进行计算机自动处理，算法的复杂度不宜过高。

5.1.2 算法复杂度应采用时间复杂度和空间复杂度进行评价。

1. 时间复杂度

时间复杂度用于评价执行算法所需要的计算工作量，按下式计算：

$$T(n) = O(f(n)) \quad (5.1.1-1)$$

式中： $T(n)$ ——时间复杂度；

n ——问题的规模；

$O(\cdot)$ ——渐进上界；

$f(n)$ ——算法关于 n 执行的次数。

2. 空间复杂度

空间复杂度用于评价执行算法所需要的内存空间，应包括算法程序和数据占用的存储空间、算法执行过程中占用的内存空间，按下式计算：

$$S(n) = O(f(n)) \quad (5.1.1-2)$$

式中： $S(n)$ ——空间复杂度；

n ——问题的规模；

$O(\cdot)$ ——渐进上界；

$f(n)$ ——算法关于 n 执行的次数。

5.2 处理流程

5.2.1 点云处理内容宜包括点云预处理、数据分析和结果整理；其中预处理流程包括点云配准、点云降噪、点云轻量化，具体处理内容应根据项目需求确定。

5.2.2 点云处理前应对原始数据文件进行检查，文件应符合下列规定：

1. 原始数据文件无损坏，无缺失；
2. 原始数据文件具有备份文件；
3. 原始数据文件具有可读取性。

5.3 点云配准

5.3.1 当选择标靶、地物特征点等作为配准点，对不同来源的单站点云进行配准时，应符合表 5.3.1 的规定。配准后，相邻站的点云重叠度不应低于 20%，点云精度应满足表 4.2.1 的要求。

表 5.3.1 单站配准点/检查点及多站连续配准次数规定

点云等级	单站配准点数目		检查点数目	多站连续配准次数
	标靶	地物特征点		
I 级	≥5	不应采用	≥1	≤3 且闭合
II 级	≥4			≤5 且闭合
III 级	≥3	≥7	≥3	≤10
IV 级				

5.3.2 点云坐标转换应采用不少于 3 个分布均匀的配准点，通过七参数模型进行坐标转换。

5.3.3 点云配准算法效果评价应符合以下规定：

1. 点云配准效果评价包括配准质量评价与配准性能评价；
2. 配准质量评价依据见本规程第 5.3.4 条的规定；
3. 配准性能评价依据见本规程第 5.1.2 条的规定。

5.3.4 点云配准质量应采用点云配准适应度和内点均方根距离进行评价。

1. 点云配准适应度

点云配准后，取目标点云的最大点间距作为距离阈值。在距离阈值范围内，源点云中的点与其在目标点云的最近邻点组成最近点对。最近点对的集合称为重叠区域。以重叠区域中最近点对数量占目标点云点数量的比例作为点云配准适应度，适应度越高，算法配准效果越好。

$$Overlap = \frac{N_o}{N_T} \quad (5.3.4-1)$$

式中：Overlap——点云配准适应度；

N_o ——重叠区域中最近点对数量，单位为对；

N_T ——目标点云点数量，单位为个。

2. 内点均方根距离

以重叠区域中最近点对的平均距离误差作为内点均方根距离，内点均方根距离越小，算法配准效果越好。

$$d_{\text{Ormse}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_o} [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2 + (z_i - z'_i)^2]}{N_o}} \quad (5.3.4-2)$$

式中： d_{Ormse} ——内点均方根距离，单位为米（m）；

x_i ——重叠区域中第 i 对最近点对的源点云点在 X 方向上的坐标值，单位为米（m）， $i=1,2,\dots, N_o$ ；

y_i ——重叠区域中第 i 对最近点对的源点云点在 Y 方向上的坐标值，单位为米（m）， $i=1,2,\dots, N_o$ ；

z_i ——重叠区域中第 i 对最近点对的源点云点在 Z 方向上的坐标值，单位为米（m）， $i=1,2,\dots, N_o$ ；

N_o ——重叠区域中最近点对数，单位为对；

x'_i ——重叠区域中第 i 对最近点对的目标点云点在 X 方向上的坐标值，单位为米（m）， $i=1,2,\dots, N_o$ ；

y'_i ——重叠区域中第 i 对最近点对的目标点云点在 Y 方向上的坐标值，单位为米（m）， $i=1,2,\dots, N_o$ ；

z'_i ——重叠区域中第 i 对最近点对的目标点云点在 Z 方向上的坐标值，单位为米（m）， $i=1,2,\dots, N_o$ 。

5.4 点云降噪与轻量化

5.4.1 点云宜进行降噪与轻量化处理，并符合以下规定：

1. 点云中存在脱离扫描目标物的异常点、孤立点时，应采用滤波或人机交互方式进行降噪处理；
2. 处理后的点云应不影响后续应用，且不损失目标物关键信息。

5.4.2 点云降噪与轻量化算法效果评价应符合以下规定：

1. 点云降噪与轻量化效果评价包括点云处理质量评价与处理效率评价；
2. 点云处理质量评价包括几何信息评价和属性信息评价；
3. 处理效率评价包括时间复杂度和空间复杂度评价。

5.4.3 几何信息可采用对称均方根距离、对称豪斯多夫距离或几何信息峰值信噪比进行评价。

1. 对称均方根距离

以预处理前后平均几何距离误差的最大值作为对称均方根距离，对称均方根距离越小，处理后的点云质量越好。

$$d_{\text{Srmse}}(P_S, P_T) = \max[d_{\text{rmse}}(P_S, P_T), d_{\text{rmse}}(P_T, P_S)] \quad (5.4.3-1)$$

$$d_{\text{rmse}}(A, B) = \sqrt{\frac{1}{N_A} \sum_{a_i \in A, b_j \in B} \|a_i - b_j\|_2^2} \quad (5.4.3-2)$$

式中： $d_{\text{Srmse}}(P_S, P_T)$ ——原始点云 P_S 和处理后点云 P_T 的对称均方根距离，单位为米（m）；

$d_{\text{rmse}}(A, B)$ ——点云 A 和点云 B 的均方根距离，单位为米（m）；

P_S ——原始点云；

P_T ——处理后点云；

$\|\cdot\|_2^2$ ——二范数的平方；

a_i ——点云 A 中的点；

b_j ——点云 B 中的点；

N_A ——点云 A 的点数。

2. 对称豪斯多夫距离

以两组点云之间的最大豪斯多夫距离作为对称豪斯多夫距离，对称豪斯多夫距离越小，处理后的点云质量越好。

$$d_{\text{SH}}(P_S, P_T) = \max[d_{\text{H}}(P_S, P_T), d_{\text{H}}(P_T, P_S)] \quad (5.4.3-3)$$

$$d_{\text{H}}(A, B) = \max(\|a_i - b_j\|_2) \quad (5.4.3-4)$$

式中： $d_{\text{SH}}(P_S, P_T)$ ——原始点云 P_S 和处理后点云 P_T 的对称豪斯多夫距离，单位为米（m）；

$d_{\text{H}}(A, B)$ ——点云 A 和点云 B 的豪斯多夫距离，单位为米（m）；

P_S ——原始点云；

P_T ——处理后点云；

$\|\cdot\|_2$ ——二范数；

a_i ——点云 A 中的点；

b_j ——点云 B 中的点。

3. 几何信息峰值信噪比

以几何形状的位置偏差作为几何信息峰值信噪比，几何信息峰值信噪比越大，预处理失真越小。

$$PSNR_g = 20 \log_{10} (P_{\max} / d_{\text{Srms}}(P_S, P_T)) \quad (5.4.3-5)$$

$$P_{\max} = \max(x_{\max} - x_{\min}, y_{\max} - y_{\min}, z_{\max} - z_{\min}) \quad (5.4.3-6)$$

式中： $PSNR_g$ ——几何信息峰值信噪比；

$P_{\max}$ ——原始点云 P_S 包围盒的最大宽度，单位为米（m）；

$d_{\text{Srms}}(P_S, P_T)$ ——原始点云 P_S 和处理后点云 P_T 的对称均方根距离，单位为米（m）；

$x_{\max}$ ——原始点云 X 坐标对应的最大值；

$x_{\min}$ ——原始点云 X 坐标对应的最小值；

$y_{\max}$ ——原始点云 Y 坐标对应的最大值；

$y_{\min}$ ——原始点云 Y 坐标对应的最小值；

$z_{\max}$ ——原始点云 Z 坐标对应的最大值；

$z_{\min}$ ——原始点云 Z 坐标对应的最小值。

5.4.4 属性信息评价包括颜色属性评价和反射强度属性评价等，属性信息峰值信噪比越大，预处理失真越小。

$$SNR_a = 10 \log_{10} (p^2 / e_{\text{sym}}) \quad (5.4.4-1)$$

式中： SNR_a ——属性信息峰值信噪比；

e_{sym} ——属性信息峰值，可选用对称均方根距离或对称豪斯多夫距离；

p ——属性峰值。

对于颜色属性评价，采用对称均方根距离计算时，应分别在色调、色饱和度、亮度空间的三个颜色分量上计算属性信息峰值，属性峰值 p 应分别设置为 2π ，1，1；采用对称豪斯多夫距离计算时，应分别在 RGB 空间的三个颜色分量上计算属

性信息峰值，且属性峰值 p 应设置为 1。对于反射强度属性评价，属性峰值 p 应设置为 65535。

5.5 成果整理

5.5.1 处理后点云存档应符合以下要求：

1. 点云应通过检查验收，并符合本规程第 4.2 节的规定；
2. 点云质量元数据应包括空间参考系、精度、密度、完整性、一致性、质检结论、质检单位、质检日期等信息，并与点云同步入库；
3. 点云集成、更新、维护等过程应有日志记录。

5.5.2 点云内容应包括各点的空间三维坐标信息，宜包括强度、色彩、类别时间标记等信息。点云文件宜采用 LAS、PTX、PTS、PCD、XYZ、ASC 及 TXT 等通用格式。

6 预制构件尺寸检测

6.1 一般规定

6.1.1 预制构件尺寸检测应根据具体工程任务选择点云质量等级。

6.1.2 截面尺寸检测时，对于圆形截面，宜采用拟合的方式提取截面圆心和半径，并进行圆度检测；对于多边形截面，宜采用拟合的方式提取截面角点，计算截面尺寸并进行对角长度检测。

6.1.3 线段间距计算时，宜拟合线段所在直线的方程。当直线平行时，根据直线方程计算直线间距；当直线相交时，宜在其中一条线段上均匀选取不少于 10 个内点作为检测点，计算检测点与另一直线的平均距离作为线段间距；当直线在三维空间中异面时，宜根据直线方程计算公垂点间距。

6.1.4 异形构件检测时，宜与异形构件设计模型进行匹配，以云图的方式对构件偏差进行检测。

6.1.5 构件截面尺寸检测时，每个构件检测的截面数量应不少于 3 处，包含构件两端截面及构件轴线中点位置附近截面。

6.2 混凝土构件检测

6.2.1 矩形和圆形截面等规则梁、柱构件尺寸检测时，宜沿轴线方向对构件点云切片，按本规程第 6.1.2 条的规定计算截面尺寸，按本规程第 6.1.5 条的规定确定检测截面数量；宜对端面点云进行分割，并按本规程第 7.1.4 条的规定计算端面点云距离作为构件长度。

6.2.2 规则墙板、楼板尺寸检测时，宜提取边缘点并拟合直线，按本规程第 6.1.3 条的规定，计算构件尺寸。

6.2.3 规则墙板、楼板对角线长度检测时，宜提取顶面或底面角点，计算对角的角点距离。

6.2.4 规则墙板、楼板的翘曲、侧向弯曲检测时，宜分割检测平面，按本规程 7.1.5 条的规定计算检测平面的翘曲或侧向弯曲程度。

6.2.5 规则墙板、楼板表面平整度检测时，宜按本规程第 7.1.5 条和第 7.1.6 条的规定计算；模拟靠尺的尺寸宜根据构件大小，选择 1m 或 2m。

6.2.6 曲梁轴线检测时，应按本规程第 7.1.10 条的规定提取与设计模型匹配后的曲梁点云轴线点，并计算其与设计轴线之间的偏差。

6.2.7 曲梁截面尺寸检测时，应按本规程第 7.1.10 条的规定提取曲梁点云轴线点，并沿轴线方向对曲梁点云切片，并按本规程第 6.1.2 条的规定计算截面尺寸。

6.2.8 预留孔洞尺寸检测时，应按本规程第 6.2.1 条的规定计算。

6.2.9 预埋件外露长度检测时，宜提取端面中心点，计算中心点与检测平面距离。

6.2.10 预留孔洞、预埋件相对位置检测时，宜提取构件及预埋件特征点，计算特征点间距。

6.2.11 预制构件模板首次使用、每使用 50 次及大修后应进行模板变形检测，检测内容应包括模板尺寸、表面平整度、相邻面夹角等关键几何信息。当模板为规则构件时，宜提取上述几何信息与设计值进行对比；当模板为异形构件时，宜与模板标准模型进行匹配，以云图的方式对模板变形量进行校核。

6.2.12 混凝土构件尺寸检测的结果用于竣工验收时，尺寸允许偏差应符合现行相关规范或设计的要求。

6.3 钢构件检测

6.3.1 构件长度检测时，当构件两端存在明显平面时，应按本规程第 7.1.4 条的规定计算构件长度；当构件两端无明显平面时，宜通过侧面点云的边缘特征计算构件长度。

6.3.2 圆钢管构件长度检测时，宜按本规程第 7.1.10 条的规定提取圆钢管轴线，计算轴线端点间距。

6.3.3 构件预拱度检测时，当构件轴线易于提取时，宜以轴线两个端点确定的直线为基准线，计算构件轴线与基准线的最大距离，作为构件预拱度；当构件轴线不易提取时，宜在分割构件底面点云后，按本规程第 7.1.5 条的规定计算构件底面点云的平面偏差值，作为构件预拱度。

6.3.4 构件平面尺寸检测时，宜提取构件平面边缘特征进行计算。

6.3.5 构件曲面尺寸检测时，应按本规程第 6.1.4 条的规定计算。

6.3.6 球体直径及圆度检测时，宜采用拟合的方式获取球直径和球心，以球表面点云到拟合球心的最大距离差作为圆度偏差。

6.3.7 型材规格尺寸及矫正偏差检测时，宜沿轴线方向对型材点云切片，按本规程第 6.1.2 条的规定计算截面尺寸。

6.3.8 复杂钢构件外形尺寸偏差检测时，应按照国家现行标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB50205 或设计的要求，确定检测项和关键控制点，将检测任务分解为多个简单构件的特征检测，然后按本规程相关规定进行检测。

6.3.9 构件截面扭曲检测时，宜沿垂直于构件轴线方向对构件点云切片，将一端切片数据投影至另一端切片所在平面，计算投影后截面扭转角，并根据切片间距计算平均扭转角。

6.3.10 钢板平整度检测时，应按本规程第 7.1.5 条和第 7.1.6 条的规定计算，模拟靠尺的尺寸宜根据钢板规格，选择 1m 或 2m；检测范围应满足产品标准的要求。

6.3.11 钢板表面缺陷检测时，应按本规程第 7.1.5 条的规定计算，以最大平面偏差值作为缺陷值。

6.3.12 构件平面相对垂直度检测时，宜对平面进行拟合，根据平面法向量夹角进行计算。

6.3.13 铣平面对轴线垂直度检测时，应按本规程第 7.1.10 条的规定提取构件轴线，根据铣平面法向量与构件轴线方向向量的夹角进行计算。

6.3.14 焊缝尺寸检测时，宜根据焊接母材及焊缝走向截取点云切面，按本规程第 6.1.2 条的规定计算焊脚尺寸。

6.3.15 螺栓孔通孔率检测时，当具有被连接构件设计模型时，宜通过设计模型获取连接构件的标准点云，按本规程第 7.1.11 条的规定进行标准点云和扫描点云的配准，提取螺栓孔孔位和半径并计算通孔率。当不具有被连接构件设计模型时，在提取螺栓孔孔位和半径后，宜选择三个不共线的螺栓孔孔心作为坐标控制点，对构件螺栓孔孔心位置进行坐标转换后计算通孔率。

6.3.16 焊接型材拼接错缝间距检测时，应在拼接前采集接缝处点云，识别并拟合接缝直线，并按本规程第 6.1.3 条的规定计算错缝间距。

6.3.17 桁架杆件轴线交点偏移检测时，应按本规程第 7.1.10 条的规定提取轴线信息，计算轴线交点。

6.3.18 桁架跨中高度检测时，应按本规程第 7.1.10 条的规定提取杆件轴线信息，计算轴线交点实测值与理论值偏差。

6.3.19 桁架预拱度检测时，应按本规程第 7.1.10 条的规定提取下弦杆和腹杆轴线信息，确定单榀桁架平面；将下弦杆轴线投影至单榀桁架平面，以轴线端点确定的直线为基准线，计算下弦杆轴线与基准线的最大距离，作为桁架预拱度。

6.3.20 钢构件尺寸检测的结果用于竣工验收时，尺寸允许偏差应符合现行相关规范或设计的要求。

7 房屋现场尺寸检测

7.1 一般规定

7.1.1 房屋现场尺寸检测时应根据实际情况选择点云质量等级。

7.1.2 房屋现场尺寸检测时，检查数量应符合以下规定：

1. 应按楼层、结构缝或施工段划分检验批；
2. 在同一检验批内，对梁、柱和独立基础，应进行构件全数检测；
3. 在同一检验批内，对墙、板应进行全数检测；
4. 对大空间房屋，墙可按相邻轴线间高度 5m 左右划分检测面，板可按纵、横轴线划分检测面。

7.1.3 处理房屋整体的点云时，宜先对各平面进行分割，根据平面拟合结果提取平面法向量，根据法向量夹角大小判断表面几何关系。

7.1.4 计算平行平面距离时，宜对一平面的内点进行随机采样，计算采样点至另一平面的垂直距离；采样点数量不应少于 10 个，应取去除距离最大值和最小值后的算术平均值作为最终计算结果。

7.1.5 平面平整度检测时，应对表面点云进行平面拟合，将拟合平面作为标准参考面，以所有数据点到标准参考面的距离作为平面偏差值。

7.1.6 平面平整度检测时，应随机在检测区域内采用模拟靠尺进行检测，以靠尺范围内平面偏差值的最大值与最小值之差作为检测值。

7.1.7 针对墙面等的平面垂直度检测包括全局垂直度检测与局部垂直度检测两种；基于重力单位方向向量进行夹角计算时，默认夹角为锐角。

1 全局垂直度（图 7.1.6(a)）按下式计算：

$$l_g = H \sin \left[\arccos \left(\vec{n}_w \cdot \vec{n}_g \right) - 90 \right] \quad (7.1.7-1)$$

式中： l_g ——全局垂直度；

H ——检测面点云的高度；

$\vec{n}_w$ ——检测面点云标准参考面的单位法向量；

$\vec{n}_g$ ——重力单位方向向量。

2 局部垂直度（图 7.1.6(b)）按下式计算：

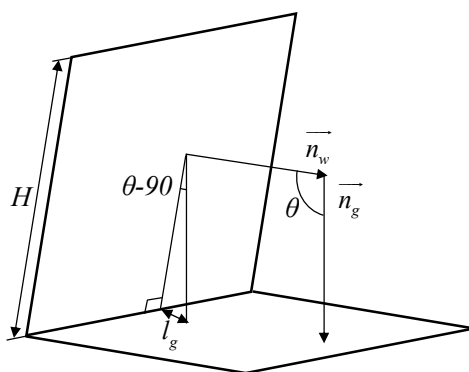
$$l_l = h \sin \arccos \left(\vec{n}_l \cdot \vec{n}_g \right) \quad (7.1.7-2)$$

式中： l_l ——局部垂直度；

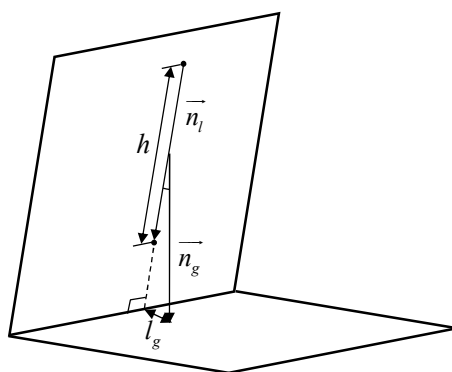
h ——模拟靠尺的长度；

$\vec{n}_l$ ——靠尺两端从上至下连线的单位方向向量；

$\vec{n}_g$ ——重力方向的单位方向向量。



(a)全局垂直度



(b)局部垂直度

图 7.1.6 垂直度检测示意

7.1.8 柱垂直度应以重力单位方向向量作为参考；基于重力单位方向向量进行夹角计算时，默认夹角为锐角，按下式计算：

$$l_c = H_c \sin \arccos(\vec{n}_c \cdot \vec{n}_g) \quad (7.1.8-1)$$

式中： l_c ——柱垂直度；

H_c ——柱高，取柱轴线端点间距或柱端面距离；

$\vec{n}_c$ ——构件轴线单位方向向量；

$\vec{n}_g$ ——重力方向的单位方向向量。

7.1.9 构件倾斜度应以重力单位方向向量作为参考；基于重力单位方向向量进行夹角计算时，默认夹角为锐角，按下式计算：

$$l_h = L_p \sin \left[90 - \arccos \left(\vec{n}_c \cdot \vec{n}_g \right) \right] \quad (7.1.9-1)$$

式中： l_h ——构件倾斜度或水平度；

L_p ——构件长度，取构件轴线端点间距或构件长度方向端面距离；

$\vec{n}_c$ ——构件轴线单位方向向量；

$\vec{n}_g$ ——重力方向的单位方向向量。

7.1.10 构件轴线提取时，对于圆柱体或长方体等常规几何体，宜采用几何形状拟合的方法获取中心线或轴线信息；对于难以直接拟合出轴线的非常规几何体，可沿粗略中心线方向对点云进行切片并对切片数据进行拟合而获取每个切片的中心点位置，通过多段切片的中心点进行中心线修正，最终得到轴线信息。

7.1.11 进行结构主体或构件的变形前后点云配准时，应选择非变形部位作为配准基础。

7.2 平面平整度检测

7.2.1 平面平整度检测时，应排除靠近边界的点云（图 7.2.1），用于检测的点云候选区域边界距离整体点云边界不应低于 20cm。

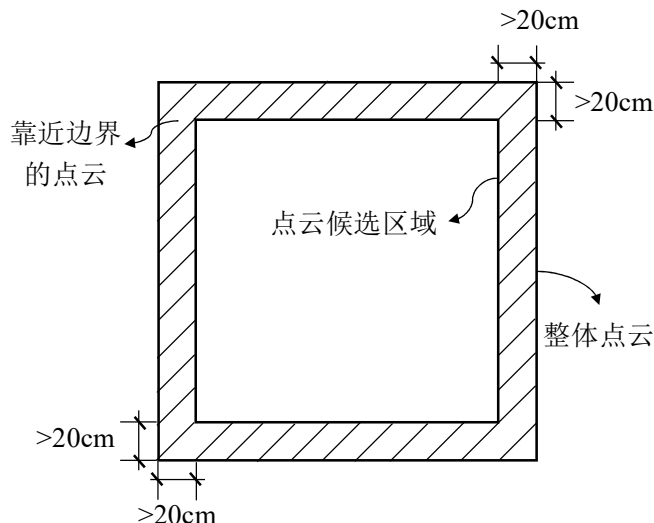


图 7.2.1 用于检测的点云候选区域

7.2.2 平面平整度检测时，应按本规程第 7.1.5 条和第 7.1.6 条的规定计算，模拟靠尺的尺寸宜取 2m。

7.2.3 平面平整度检测时，宜模拟 2m 靠尺与任意边呈 0° 、 45° 、 90° 、 135° 进行检测（图 7.2.3）。以靠尺的中点位置作为检测点，将同一检测点下所有角度的测量结果最大值作为检测值。

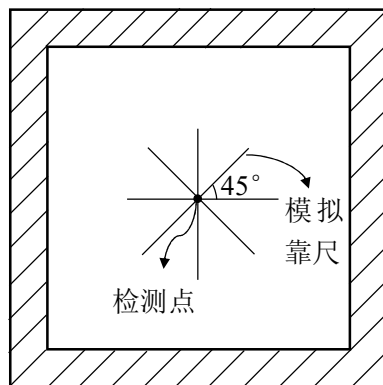


图 7.2.3 模拟靠尺角度示意

7.2.4 平面平整度检测时，应在点云候选区域随机选取检测点位置，检测数量不应小于 3 次。

7.2.5 平面平整度检测的结果用于竣工验收时，尺寸允许偏差应符合现行相关规范的要求。

7.3 墙面垂直度检测

7.3.1 墙面垂直度检测时，应按本规程第 7.2.1 条的规定确定用于检测的点云候选区域。

7.3.2 墙面垂直度检测时，应按本规程第 7.1.7 条的计算方法，进行全局垂直度检测和局部垂直度检测。

7.3.3 墙面局部垂直度检测时，应在点云候选区域随机选取检测点位置，检测数量不应小于 3 次。

7.3.4 阴阳角方正检测时（图 7.3.4），应在两个待测表面的交线上按 20cm 等间距选取检测点；宜以检测点为中心，以 20cm 邻域范围内的各表面点云计算局部法向量并计算夹角。

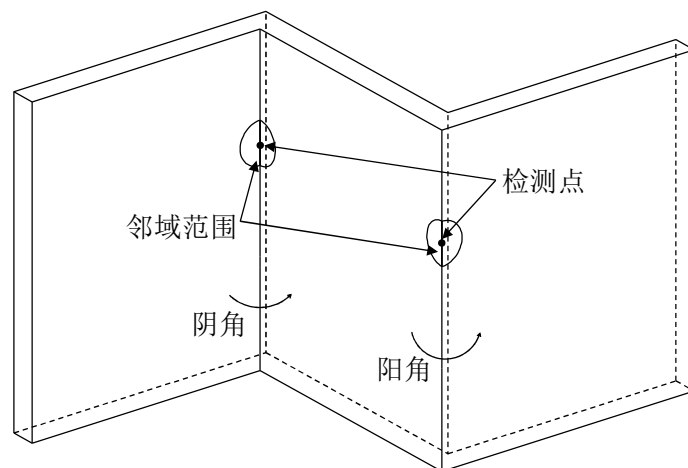


图 7.3.4 阴阳角与检测点示例

7.3.5 阴阳角方正检测和墙面垂直度检测的结果用于竣工验收时，尺寸允许偏差应符合现行相关规范要求。

7.4 施工尺寸偏差检测

7.4.1 施工后构件绝对位置检测时，点云应包含易于提取的现场控制点，控制点不应少于 3 个且非共线。

7.4.2 现浇结构模板安装轴线位置检测时，宜根据模板点云特征，分别计算纵、横两个方向的轴线偏差。

7.4.3 现浇结构模板底模相对高差检测时，应按本规程第 7.1.3 条和第 7.1.4 条的规定，计算检测平面之间的距离，作为相对高差检测值。

7.4.4 现浇结构模板表面平整度检测时，应按本规程第 7.1.5 条和第 7.1.6 条的规定，分别在模板进场及安装后进行，模拟靠尺尺寸宜根据模板大小，选择 1m 或 2m。

7.4.5 现浇结构模板预拱度检测时，宜提取模板顶面与侧面的边缘点，通过边缘点拟合基准平面，计算模板顶面点云至基准平面的最大距离作为预拱度大小。梁、板净跨宜沿跨度方向取同侧角点计算。

7.4.6 后浇带预留钢筋间距检测时，宜分割钢筋点云，拟合钢筋直线；沿固定方向，在每条钢筋直线上均匀选取不少于 3 个检测点，计算检测点至下一钢筋直线的平均垂直距离作为检测结果。

7.4.7 现浇结构截面尺寸检测时，应按本规程第 6.1.2 条的规定计算。

7.4.8 室内空间尺寸检测时，应按本规程第 7.1.3 条和第 7.1.4 条的规定计算平面距离，检测结果用于竣工验收时，与设计值的偏差应符合表 7.4.8 的规定。

表 7.4.8 室内空间尺寸的允许偏差及检验方法

项目	允许偏差（mm）	允许极差（mm）
室内净高度	-20	20
室内净开间、进深	±15	20

7.4.9 柱垂直度检测时，应按本规程第 7.1.10 条和第 7.1.8 条的规定进行轴线提取和垂直度计算。

7.4.10 混凝土预制构件安装位置检测时，点云应符合本规程第 7.4.1 条的规定，通过现场控制点将点云转换至施工坐标系，并按本规程第 7.1.10 条的规定提取基础、竖向构件及水平构件的中心线或轴线，进行偏差计算。

7.4.11 梁、桁架的倾斜度检测时，应按本规程第 7.1.9 条的规定计算。

7.4.12 梁、板地面或顶面标高检测时，点云应符合本规程第 7.4.1 条的规定，通过现场控制点将点云转换至施工坐标系。

7.4.13 板类构件接缝宽度检测时，宜提取边缘直线，按 20cm 等间距在其中一条边缘直线上选取检测点，计算检测点至另一边缘线的垂直距离，取最大距离和最小距离作为检测结果。

7.4.14 钢结构主体的整体垂直度和整体平面弯曲检测时，宜与标准模型进行匹配并提取立面内所有柱构件轴线点，提取柱顶轴线点与设计柱身轴线偏差用于计算整体垂直度，提取柱底轴线点与控制轴网偏差用于计算整体平面弯曲。

7.4.15 钢梁安装后进行平面内弯曲检测时，宜提取翼缘点云，投影至腹板平面后，计算矢高。

7.4.16 钢梁安装后进行平面外弯曲检测时，宜提取腹板点云，投影至翼缘平面后，计算矢高。

7.4.17 主梁、次梁表面相对高差检测时，应按本规程第 7.1.3 条和第 7.1.4 条的规定，计算检测平面之间的距离，作为相对高差检测值。

7.4.18 施工尺寸偏差检测的结果用于竣工验收时，应符合现行规范对应项目的允许偏差规定。

7.5 结构变形监测

7.5.1 结构变形监测时，应符合以下一般规定：

1. 各重要结构在工程设计时，应对变形监测的内容和范围做出统筹安排，并应由监测单位制定详细的监测方案。首次观测，宜独立测量两次监测体初始状态的监测数据，当两次观测数据的误差不大于极限误差时，可取其算术平均值作为该项目变形测量的初始值。

2. 变形监测作业前，应收集相关的工程资料及设计图纸，并依据结构特征、工程类型及规模、施工方案等因素，进行变形监测方案设计。方案设计应包括监测目的、精度等级、监测方法、监测周期、项目预警值等内容。

3. 监测周期，应根据监测体的变形特征、变形速率、荷载变化、观测精度和工程地质条件等因素综合确定。监测期间，应根据变形量的变化情况适当调整。

4. 各期的变形监测，应满足下列要求：

- 1) 在较短的时间内完成；
- 2) 采用相同的数据采集设备、方案及相同的数据处理方式；
- 3) 监测人员相对固定；

- 4) 记录相关的环境因素, 包括荷载、温度等;
5. 每期观测前, 应对所使用的仪器和设备进行检查、标定和矫正, 并做好记录。
6. 每期观测后, 应及时处理观测数据。当数据处理结果出现下列情况之一时, 必须即刻通知建设单位和施工单位采取相应措施:
- 1) 变形量达到预警值或接近允许值;
 - 2) 变形量出现异常变化。

7.5.2 变形监测时, 如水平变形、垂直变形、三维位移、主体倾斜、构件挠度等, 应按本规程第 7.1.11 条的规定进行点云配准, 提取观测特征点并计算变形量。

7.5.3 结构变形监测时, 变形允许偏差应符合现行相关规范的要求。

7.6 机电管线及预埋预留检测

7.6.1 导管、管槽等设备和配件的转弯半径检测时, 应按本规程第 7.1.10 条的规定提取检测对象轴线点并计算截面尺寸, 检测对象的转弯半径按下式计算:

$$R = R_{\text{axis}} - R_{\text{sec}} \quad (7.6.1-1)$$

式中: R ——检测对象转弯半径;

R_{axis} ——根据轴线点拟合的半径;

R_{sec} ——检测对象截面半径或截面底边长的一半。

7.6.2 柜、台、箱、盘安全间距检测时, 应按本规程第 7.1.3 条和第 7.1.4 条的规定计算检测平面之间的距离。

7.6.3 柜、台、箱、盘垂直度检测时, 应按本规程第 7.1.7 条的规定计算全局垂直度。

7.6.4 机架、母线槽等设备、配件垂直度和水平度检测时, 应按本规程第 7.1.7 条和第 7.1.9 条的规定计算全局垂直度和水平度。

7.6.5 母线槽支架圆钢吊架直径检测时, 应按本规程第 7.1.10 条的规定计算圆钢直径。

7.6.6 伸缩节检测时, 宜对伸缩节点云进行识别、分割, 以伸缩节中点位置作为伸缩节位置。

7.6.7 进入配电(控制)柜、台箱内的导管入口位置检测时, 应按本规程第 7.1.10 条的规定拟合导管轴线点, 计算导管入口处轴线点至基础面距离。

7.6.8 敞开式灯头、景观灯、吊扇等电器设备对地距离检测时, 宜拟合地面平面, 计算电器设备与地面平面最小距离。

7.6.9 霓虹灯灯管与建筑物表面距离检测时，应按本规程第 7.1.10 条的规定提取灯管轴线点及直径，计算轴线点至建筑物表面的最小距离与灯管半径之差。

7.6.10 照明开关检测时，宜对照明开关点云进行识别、分割，分别计算照明开关点云与门框边缘或地面、顶板的最小距离。

7.6.11 支持件、支架、吊架等支撑配件间距检测时，宜对支撑配件点云进行识别、分割，计算支撑配件点云中点间距。

7.6.12 金属灯柱地脚螺栓及螺孔检测时，应按本规程第 7.1.10 条和第 7.1.8 条的规定进行螺杆轴线点提取和垂直度计算；宜将螺杆点云投影至水平面、将螺孔点云投影至连接板平面，进行圆拟合，并计算圆心间距。

7.6.13 接地模块埋置深度检测时，应按本规程第 7.1.3 条和第 7.1.4 条的规定计算接地模块顶面与地面之间距离。

7.6.14 接地模块埋置间距检测时，宜对接地模块点云进行识别、分割，计算模块点云中心点间距与接地模块长度差值，作为埋置间距。

7.6.15 导管敷设沟槽检测时，应按本规程第 7.1.10 条的规定进行沟槽轴线点提取并计算截面尺寸。

7.6.16 机电管线及预埋预留检测的结果用于竣工验收时，应符合现行规范对对应项目的允许偏差规定。

8 竣工数字可视化模型

8.1 精细度级别定义

8.1.1 基于点云获得的竣工数字可视化模型的精细度为几何表达精细度。

8.1.2 竣工数字可视化模型的精细度级别划分为 LOD1、LOD2、LOD3、LOD4：

1. LOD1 模型为简易模型，表达竣工数字可视化模型的空间位置、略粗几何形态；
2. LOD2 模型为基础模型，表达竣工数字可视化模型的语义、空间位置、粗略几何形态；
3. LOD3 模型为标准模型，表达竣工数字可视化模型的语义、空间位置、表面基本几何形态、纹理特征；
4. LOD4 模型为精细模型，表达竣工数字可视化模型的语义、空间位置、几何形态、纹理特征。

8.1.3 竣工数字可视化模型在应用项目中所需达到的精细度等级可参考本规程表 8.1.3。

表 8.1.3 应用项目的精细度等级划分参考

精细度	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
应用项目	规划选址、 室内导航	建筑规划、 进度统计	虚拟漫游、 建筑维护	深化设计、 工程管理

注：表中建筑维护指对建筑物进行数字化存档及维护整改。

8.1.4 竣工数字可视化模型在应用项目中应满足对应的规范要求。

8.1.5 竣工数字可视化模型应根据实际项目需求确定模型的精细度级别，表达消防通道、出入口、通风口等与安全密切相关的设施时，建筑结构的竣工可视化模型的精细度不应低于 LOD3。

8.2 模型三维重建

8.2.1 LOD1 级模型要求如下：

1. 点云应在密度、精度、空间覆盖上完整地反映建筑的形态和结构特征；
2. 根据成果质量和精度要求，对处理后数据可进行必要的预处理操作；
3. 应根据点云建立三维有向包围盒，包围盒由原始点云平面投影的有向包围盒及包含底部、顶部的拉伸体构建。

8.2.2 LOD2 模型要求如下：

1. 点云应在密度、精度、空间覆盖上完整地反映建筑的形态和结构特征；

2. 根据成果质量和精度要求,对处理后数据可进行必要的预处理操作;
3. 应根据应用需求对建筑对象的点云进行分类;
4. 宜对点云进行建筑对象识别分类;
5. 管线及通道等结构应分段对其建立三维有向包围盒。其余建筑对象的三维有向包围盒,应由其平面投影的有向包围盒及包含底部、顶部的拉伸体构建。

8.2.3 LOD3 模型要求如下:

1. 建筑外表面模型,应包括建筑物主体的外表面模型和支撑结构的表面模型;
2. 建筑主体外表面模型的平面轮廓可根据需求进行简化,但应保留其基本特征;
3. 建筑内表面模型应包括建筑主体的内表面模型,内表面模型与外表面模型合并时,应顾及内壁和外壁的厚度;
4. 管线等结构的表面模型应反映管线的类型、截面、走向,建立时应分段按截面扫描生成其表面模型,并对分段模型的连接与衔接进行平滑处理;
5. 对建立后的表面模型,宜根据相应影像生成纹理。

8.2.4 LOD4 模型要求如下:

1. 对不规则建筑构件,宜使用非参数化方法进行构建;
2. 建筑物的构件实体模型应按照现行国家标准《建筑信息模型设计交付标准》GB/T51301 的规定执行;
3. 构件级实体模型单元应表明直接的关系;
4. 应按照功能及特征进行分类,建立模型构件库,模型构件应遵循相对独立性原则;宜通过拼接的方式,组成建筑物表面模型。

9 成果归档

9.1 一般规定

- 9.1.1** 检测报告应记录点云来源、精度等级。
- 9.1.2** 检测报告应加盖检测机构公章以及检测负责人签章。
- 9.1.3** 检测报告应包含完整的数据处理流程和技术处理框架。
- 9.1.4** 检测报告应明确各项指标。
- 9.1.5** 检测报告应内容真实，表述准确。

9.2 归档内容

- 9.2.1** 成果归档内容中应包含成果清单、检测报告、原始点云、重要中间过程点云及其它相关资料。

用词说明

为便于在执行本规程条款时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”；

- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”；

- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。

- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

主要引用标准名录

- 《建筑工程施工质量验收统一标准》 GB50300
- 《混凝土结构设计规范》 GB50010
- 《城市地下空间三维建模技术规范》 GB/T41447
- 《城市三维建模技术规范》 CJJ/T157
- 《地面三维激光扫描工程应用技术规程》 T/CECS790
- 《钢结构工程施工质量验收标准》 GB50205
- 《建筑装饰装修工程质量验收标准》 GB50210
- 《建筑信息模型设计交付标准》 GB/T51301
- 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB50204
- 《地面三维激光扫描作业技术规程》 CH/Z3017
- 《地理空间点云数据压缩编码规范》 T/CSGPC012
- 《地面三维激光扫描工程应用技术规程》 T/CECS790
- 《机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法》 GB/T36100
- 《机载激光雷达数据获取技术规范》 CH/T8024
- 《装配式混凝土结构技术规程》 JGJ1

中国工程建设标准化协会标准

基于激光三维扫描的建筑检测技术标准

T/CECS XXXX-2023

条文说明

制 定 说 明

《基于激光三维扫描的建筑检测技术标准》（T/CECS XXXX-2023），经中国工程建设标准化协会标准 20XX 年 X 月 XX 日以第 XXXX 号公告批准发布。

本规程制定过程中，编制组进行了广泛的调研和大量的试验和理论研究，认真总结了研究成果和实践经验，同时参考了国外先进技术法规、技术标准，通过试验取得了重要技术参数。

为便于广大技术和管理人员在使用本规程时能正确理解和执行条款规定，《基于激光三维扫描的建筑检测技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条款规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。本条文说明不具备与标准正文及附录同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规定的参考。

目 次

1	总则	(38)
2	术语和符号	(39)
2.1	术语	(39)
2.2	符号	(39)
3	基本规定	(40)
4	点云数据	(41)
4.1	基本几何属性	(41)
4.2	数据质量	(42)
5	数据处理	(43)
5.1	一般规定	(43)
5.2	处理流程	(43)
5.3	点云配准	(43)
5.4	点云降噪与轻量化	(44)
5.5	成果整理	(44)
6	预制构件尺寸检测	(46)
6.1	一般规定	(46)
6.2	混凝土构件检测	(46)
6.3	钢构件检测	(47)
7	房屋现场尺寸检测	(51)
7.1	一般规定	(51)
7.2	平面平整度检测	(51)
7.3	墙面垂直度检测	(52)
7.4	施工尺寸偏差检测	(52)
7.5	结构变形监测	(54)
7.6	机电管线及预埋预留检测	(55)
8	竣工数字可视化模型	(57)

8.1 精细度级别定义	(57)
8.2 模型三维重建	(57)
9 成果归档	(58)
9.1 一般规定	(58)
9.2 归档内容	(58)

1 总则

1.0.1 本条阐明了制定基于激光三维扫描的建筑检测技术标准的目的。点云数据已广泛地应用于工程建筑行业并发挥巨大的作用,但目前针对基于点云数据的建筑尺寸数字化检测并无标准可依。为规范点云数据在建筑尺寸数字化检测中的应用,统一点云数据的质量、处理方法、预制构件尺寸检测、房屋现场尺寸检测、竣工数字可视化模型、成果归档等要求,促进建筑尺寸数字化检测水平的提高,制定本技术规程。

1.0.2 本条规定了本规程的适用范围。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1~2.1.22 本规程的术语是根据现行中华人民共和国国家和建筑行业标准化指导性技术文件《城市地下空间三维建模技术规范》GB/T41447、《城市三维建模技术规范》CJJ/T157、《地面三维激光扫描工程应用技术规程》T/CECS790 等给出。

2.1.4 本条定义了点云精度是一种相对精度，受点云采集设备精度及点云处理算法精度的影响。其中，真实测量值指采用更高精度的测量手段得到的测量值，如对圆孔半径等微小尺寸进行检测时，以游标卡尺得到的测量值作为真实测量值。

2.1.5 本条定义的平面检查点的真实坐标是由更高精度定位设备获取的该点在真实场景中的绝对坐标。通过某一平面中的平面检查点的坐标能够得到该平面的位置信息；基于某平面检查点的真实坐标能够得到该平面真实的位置信息。

2.2 符号

2.2.1 本规程仅列出了常用符号，其他符号均在条文相应处单独说明。

3 基本规定

3.0.1 建筑尺寸数字化检测应以实际情况为基础；采用点云进行检测时应达到减少工厂或现场检测作业难度、提高检测效率、降低检测成本等目的。

3.0.2 本条规定了用于建筑尺寸数字化检测的点云的必要数据成分。点云用于描述目标物的空间信息，因此应包含空间三维坐标，而颜色、阵列、法向量等其他信息属于非必要数据成分，可根据项目需求判断是否需要获取。

3.0.3 工程应用中，基于点云的建筑尺寸数字化检测项目应提供处理前和处理后的点云以保证结果的可靠性。

3.0.4 基于点云的建筑尺寸数字化检测时，不限制点云的采集方式，但点云采集设备应满足相应现行规范的要求，且点云质量应满足本规程规定的的数据质量要求。例如，陆地式三维激光扫描仪应按国家现行计量技术规范《地面激光扫描仪校准规范》JJF1406 的规定校准；结构光扫描仪应按国家现行计量技术规范《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》JJF1951 的规定校准。

3.0.5 本条建议了工程应用中的存储管理结构并要求了项目信息的管理安全。

3.0.6 工程应用中，点云的描述应包含具体相关信息以方便访问和追溯。为了获取目标物的形状或位置随时间变化的特征信息，工程项目应采用国家统一的时间基准进行记录。完整项目是检测项目的最上级目录，包含所有具体的检测项目，一般可用工程项目名进行命名。

3.0.7 检测对象一般可以根据材质划分为混凝土结构、钢结构等。进行基于点云的建筑尺寸数字化检测时，应遵守现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB50300 的规定。不同的建筑结构应遵守相应的规范规定，且检测抽样频率不应低于现行规范规定的人工检测频率。例如，混凝土结构的各分项工程检验批次、抽样频率不应低于《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 中的相关规定；钢结构的各分项工程检测批次、抽样频率不应低于《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 中的相关规定。

3.0.8 模型的可扩展性是指模型应允许修改并可增加新的功能。

4 点云数据

4.1 基本几何属性

4.1.1 本条首先给出点云中某个点的最近邻点间距的计算公式；基于所有点的最近邻点间距可计算出点云的平均点间距及最大点间距，二者均反映了点云分布情况。平均点间距越小则点云分布越紧凑，可根据平均点间距估算点云处理算法的半径及距离参数。最大点间距越小则点云分布越紧凑；进行检测任务时，最大点间距应小于检测对象验收的允许偏差。本规程采用最大点间距作为点云分级的重要指标，表 4.2.1 给出了不同等级点云的最大点间距的定量要求。

4.1.2 点云密度反映了点云的稀疏程度。点云覆盖区域面积包含检测对象的表面积及检测区域的背景面积。

4.1.3 点云可能含有多个平面，选取平面控制点时，应从每个平面上选取不少于 3 个平面控制点；平面控制点的总数量视云点密度、点云中平面的个数、工程任务等具体情况确定，不宜少于 6 个。每个平面上的平面控制点两两组成平面控制点对，因此，每个平面上的平面控制点对的数量不少于 3 对，全部平面控制点对的数量不宜少于 6 对。

每个平面上的平面控制点可以确定该平面的位置，这些平面控制点的真实坐标可以确定该平面的真实平面位置，同一平面上的平面控制点坐标与真实坐标的接近程度能够反映该平面的平面精度。因此，计算所有平面控制点坐标与其真实坐标的误差，能够反映点云平面精度。

同一平面控制点对内的两个平面控制点的间距与真实间距的接近程度，能够反映该平面相较于真实平面的变形程度。例如数据采集过程中设备受环境影响产生震动，导致点云平面不平整，平面控制点对内两个平面控制点的间距与真实间距不相等。如图 1(a)所示，平面控制点 p_1 与 p_2 的真实间距 d_1 为 20.00mm；由于采集操作不当，点云平面产生突起，平面控制点 p_1 与 p_2 的间距 d_2 为 20.36（图 1(b)）；当点云平面突起更明显时（图 1(c)），平面控制点 p_1 与 p_2 的间距 d_3 为 36.05mm，与真实间距 d_1 的差距变大。同一平面上的平面控制点对内两点间距越接近真实间距，则该平面越接近真实平面。因此，计算所有平面控制点对内两点间距与真实间距的误差，也能够反映点云平面精度。

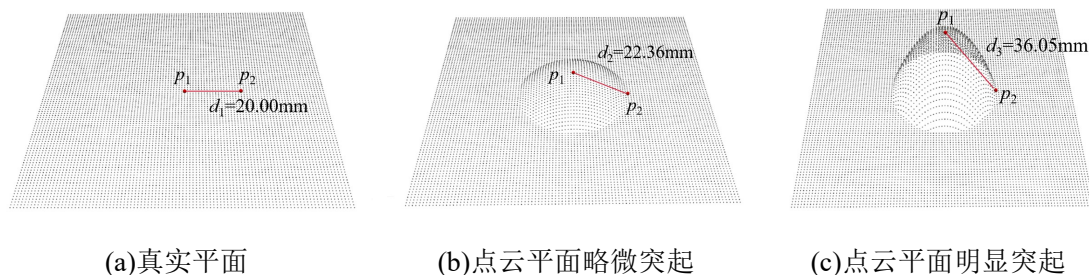


图 1 点云平面变形示意图

4.2 数据质量

4.2.1 本规程采用点云精度、点云密度及最大点间距作为点云质量的评价指标。点云精度反映了点云测量值与真实测量值之间的接近程度，点云精度越高，点云质量越好；点云密度反映了点云分布的密集程度，点云密度越大，点云质量越好；最大点间距反映了点云分布的离散程度，最大点间距越小，适用的工程任务范围更广，点云质量越好。

本条将基于点云数据的建筑尺寸数字化检测的工程任务划分为工程检测、工程监测、工程进度统计及可视化建模。表 4.2.1 以目前能够实现的最高质量点云作为 I 级点云，能满足当前全部任务的要求；以目前能够实现的较高质量点云作为 II 级点云，能满足当前大部分任务的要求；III 级点云的精度较差、密度较低、最大点间距较大，不适用于对点云质量要求高的工程检测，但可用于部分工程监测、进度统计及可视化建模任务；IV 级点云仅可用于部分用于展示的可视化建模任务。

4.2.2 由于建筑领域的处理对象类型复杂，实际工程任务中，除应满足表 4.2.1 中规定的准用点云质量外，还应根据检测任务的具体要求，采用更高质量的点云。

5 数据处理

5.1 一般规定

5.1.2 本条用于对点云处理算法进行评价。算法复杂度表示算法执行时间规模或者空间规模的增长变化趋势。算法复杂度利用渐进符号描述，即忽略一个函数中增长较慢的部分以及各项的系数，而保留可以用来表明该函数增长趋势的重要部分。本条中算法复杂度为最坏复杂度，渐进符号为 O ，为每个输入规模下算法消耗时间最长或者空间最大的复杂度。 $O(f(n))$ 表示函数 $T(n)$ 的渐进上界，当且仅当 $\exists$ 正数 c, n_0 ，使得 $\forall n > n_0, 0 \leq T(n) \leq c \cdot f(n)$ 。例如，假设每行代码执行的耗时相等，执行次数函数为 $T(n) = 2n^2 + 2n + 1$ ，此时复杂度为 $O(n^2)$ 。常用的时间复杂度量级包括常数阶 $O(1)$ 、对数阶 $O(\log n)$ 、线性阶 $O(n)$ 、线性对数阶 $O(n \log n)$ 、平方阶 $O(n^2)$ 、立方阶 $O(n^3)$ 、K次方阶 $O(n^k)$ 和指数阶 $O(2^n)$ ，对应的执行效率越来越低。常用空间复杂度包括常数阶 $O(1)$ 、线性阶 $O(n)$ 和平方阶 $O(n^2)$ ，对应的空间占用率越来越大。

5.2 处理流程

5.2.2 文件可读取性表示文件可从存储设备中读取出来，以供计算机进行数据处理或直接显示。

5.3 点云配准

5.3.1 地物特征点是指地物平面形状的轮廓点、中心点、线型和线条方向变化点，如房屋的角点、道路的交叉点和边界线的方向变化点等。配准的目的在于找出两个不同坐标系下点云的转换关系，组成新的三维数据集。配准点又称为同名点，由不同位置对同一物点二次扫描得到。不同扫描站之间的转换关系可用一个三维旋转矩阵和一个平移向量进行描述，需要在不同坐标系的点云中找出不少于3个配准点进行求解。闭合是指利用对同一物点的扫描，使得当前扫描站与之前扫描站建立约束，形成闭环。采用配准点进行配准时，由于配准点的识别、距离测量以及坐标转换过程的误差传递，多站连续配准后会造成点云精度降低，此时需

要控制配准次数，并使得扫描站点闭合以减少累积误差。检查点为具有真实坐标的点，用于配准误差校验。

5.3.2 七参数模型为两个三维空间坐标系的坐标转换模型，包含三个坐标平移量、三个坐标旋转角度和一个尺度缩放比例因子，通常比例因子固定为 1。

5.3.4 源点云为待坐标变换的点云，目标点云为作为参考坐标系的点云。

5.4 点云降噪与轻量化

5.4.3 降噪和轻量化操作均会对原始点云进行修改，过程中信息的损失可通过处理前后点云之间的几何信息差异进行评价。几何峰值信噪比表示处理前目标物体到包围框的最大距离与处理前后物体的距离差值的比值，反映处理前后点云的几何信息差异。

5.4.4 颜色可使用 RGB 空间或者 HSI 空间描述。RGB 空间的参数为红、绿、蓝，分别用符号 R, G, B 表示，取值范围均为 0~1。HSI 空间的参数为色调、饱和度、明度，分别用符号 H, S, I 表示，其中 H 的取值范围为 $0 \sim 2\pi$ ， S 和 I 的取值范围为 0~1。RGB 空间和 HSI 空间可互相转换， H 和 R, G, B 的关系如下：

$$H = \begin{cases} \theta & \text{if } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{if } B > G \end{cases}$$

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right\}$$

S 和 R, G, B 的关系为：

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)]$$

I 和 R, G, B 的关系如下：

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B)$$

反射强度的值取决物体反射率，到物体表面的距离以及入射角，通常标定后的激光雷达，对同一物体的具有相同的强度值，其取值范围为 0~65535。

5.5 成果整理

5.5.1 本条给出了处理后点云的存档要求：

1. 处理后点云应满足数据质量要求；

2. 点云质量元数据是指用于说明点云的特征和内容的数据，如名称、时间、格式、数据量和坐标系统等；

3. 点云可由不同数据来源的集成、更新、维护，记录操作过程日志有助于项目管理。

6 预制构件尺寸检测

6.1 一般规定

6.1.1 构件尺寸检测时，若尺寸偏差允许值小于点云精度或最大点间距，则检测结果可靠性不足，应根据相关规范对构件尺寸的偏差允许值确定点云质量等级。

6.1.2 受加工偏差影响，对于圆形截面，进行圆度检测以确定截面与理论圆的偏差；对于多边形截面，进行对角线检测以确定截面与标准多边形的偏差。

6.1.3 根据直线方向向量判断直线平行关系，当直线平行时通过直线方程可直接计算直线间距；大多数设计为平行的线段，例如预制叠合板外露钢筋、矩形楼板对边边缘等，由于存在制造偏差，通过直线方程计算线段间距会发现线段所在直线将在远端相交，直线间距不存在，因此计算点到直线的平均距离；当直线异面时，公垂点间距可表征直线间距离。

6.1.4 异形构件，例如拱形构件或弯扭构件，几何特征较难描述，直接获取特征点坐标不能满足检测精度，且难以通过算法进行拟合。可将扫描点云与设计模型进行配准，全数或抽样计算扫描点云与设计模型的间距。抽样时，检测点间距应根据构件允许偏差确定。

6.1.5 点云支持单个构件的多截面尺寸检测。等截面构件因加工偏差导致截面尺寸沿轴线方向产生变化时，仅进行单个截面的尺寸检测存在局限性。当算力足够时，应进行多个截面的尺寸检测；当算力不足时，应至少包含构件两端以及轴线中点位置截面。

6.2 混凝土构件检测

6.2.1 采用沿轴线切片的方式进行梁、柱截面尺寸检测，可避免截面尺寸沿轴线方向变化带来的检测局限性，综合反映整个构件尺寸质量。对于预制混凝土梁、柱构件，构件长度影响后续的装配过程，因此需对梁长或柱高进行检测。

6.2.2 等厚度的矩形墙板、楼板为规则墙板、楼板。检测时关注的尺寸信息为平面尺寸及板厚，由于板厚与平面尺寸相差较大，平面尺寸沿板厚度方向变化较小，因此选择平面边缘点来计算墙板、楼板尺寸。其他材料的墙板可参考混凝土墙板的方法进行检测。

6.2.3 墙板、楼板对角线长度检测用于检查墙板、楼板平面是否为标准的矩形或平行四边形。

6.2.5 墙板、楼板表面平整度检测可参考现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的表面平整度人工检测方法，在表面点云上模拟靠尺进行检测。

6.2.6 曲梁的轴线特征不便于表述，因此计算实际轴线点与设计轴线点之间的偏差。

6.2.7 视曲梁轴线微段为直线，因此沿轴线方向取曲梁切片进行尺寸检测。

6.2.8 视预留孔洞为空心柱，因此可参照柱尺寸检测方法检测孔洞尺寸。

6.2.9 对于预埋件例如预埋钢筋、预埋螺杆、型钢等，计算预埋件端点与外露面之间的距离。

6.2.10 预留孔洞、预埋件相对位置检测时，应确保每组检测对象的特征点一致，例如圆形预留孔可取圆心、矩形预留孔可取孔心或同方位角点、预埋型材可取型材形心或同方位角点。

6.2.11 模板首次使用、周期性使用以及大修后可能发生变形，影响预制构件产品质量，因此需对关键几何信息进行变形检测。当模板为规则构件时，模板的关键几何信息通常可通过边缘特征、角点特征等几何特征进行提取，当模板为异形构件时，与标准模型进行配准有利于模板变形量的检测。

6.3 钢构件检测

6.3.1 当构件两端点云便于提取时，可直接计算端面距离作为构件长度。对于薄壁矩管，薄壁槽钢等壁厚较薄的构件，两端点云较难提取，可计算构件沿长度方向的边缘线长度；当存在多条完整边缘时，宜取各边缘线长度平均值。

6.3.2 当构件端面无明显平面，沿长度方向也无明显边缘时，宜以轴线长度作为构件长度。

6.3.4 对于常规平面例如圆形、矩形平面等，可提取平面边缘线，通过拟合或计算半径、角点间距或边缘线间距作为平面尺寸；对于复杂多边形平面，为准确描述多边形尺寸，可提取平面边缘线，将边缘线分解为多段直线，通过边缘线间距或角点间距确定多边形尺寸。

6.3.5 空间曲面构件的几何特征较难具体描述，可将扫描点云与设计模型进行配准，全数或抽样计算扫描点云与设计模型的间距作为偏差；设计模型测点间距或面片大小应根据构件允许偏差确定。

6.3.6 对球体进行圆度检测，以确定球面点云与理论球体的偏差。

6.3.7 型材规格及截面矫正偏差均为型材的截面尺寸检测，型材规格应按本规程第 6.1.2 条进行确定。

6.3.8 复杂钢构件外形尺寸偏差检测时，宜根据检测项目，深入分析检测对象几何特征并制定合适的检测方式。表 1 给出了多节钢柱外形尺寸部分检测项的示例。

表 1 多节钢柱外形尺寸偏差检测

检测项目	检测方法	图例
一节柱高度 H	提取钢柱两端铣平面点云，按本规程 7.1.4 条的规定计算铣平面距离。	
两端最外侧安装孔距离 l_3	将最外侧安装孔孔壁点云投影至腹板平面后，拟合孔心，计算孔心距离。	
铣平面到第一排安装孔距离 a	将最外侧安装孔孔壁点云投影至腹板平面后，拟合孔心，计算孔心至铣平面距离。	
柱身弯曲矢高 f	提取钢柱翼缘表面点云，按本规程 6.3.3 条的规定计算预拱度。	
一节柱的柱身扭曲	将钢柱上端铣平面点云投影至下端铣平面所在平面，按本规程第 6.3.4 条的规定，分别提取铣平面的边缘特征并提取角点，计算投影后上端铣平面角点与下端铣平面对应角点距离，取距离最大值作为扭曲值。	
牛腿端孔到柱轴线距离 l_2	按本规程第 7.1.10 条的规定，选择工字形截面进行轴线点提取并根据轴线点拟合轴线方程。将牛腿端孔孔壁数据分别投影至牛腿腹板两侧平面并拟合孔心，计算孔心的中点至轴线距离。	
牛腿的翘	分割与牛腿上翼缘板上表面相邻的	

曲或扭曲 Δ	钢柱翼缘表面点云及对应钢柱翼缘区域的任意一侧腹板点云,按本规程第 7.1.3 条的规定: 计算牛腿上翼缘板与钢柱翼缘法向量夹角,根据牛腿设计外伸长度换算为牛腿翘曲大小; 计算牛腿上翼缘板与钢柱腹板法向量夹角,根据牛腿设计宽度换算为牛腿扭曲大小。考虑到钢柱翼缘、腹板平面可能存在缺陷, 分割钢柱平面时,平面长度不应小于一倍钢柱截面高度; 考虑到焊缝区域存在焊接变形, 距离钢柱任意焊缝 5cm 范围内的点云不宜参与平面法向量计算。	
柱截面尺寸	按本规程第 6.1.2 条的规定, 取柱截面切片进行形状拟合。	
柱脚底板平面度	按本规程第 7.1.5 条的规定, 计算平面偏差值。	

6.3.9 构件截面扭曲检测时, 以其中一个截面切片作为基准, 将另一截面切片投影至基准平面, 根据截面特征计算扭转角度, 如对称轴夹角等。此外, 宜根据两切片平面之间的距离, 计算截面沿轴线长度的平均扭转角。

6.3.10 钢板平整度检测采用模拟人工靠尺的方法进行。

6.3.11 钢板表面缺陷如蚀坑、划痕等进行定量检测时, 计算缺陷点云与钢板表面距离作为缺陷值, 采用高精度点云进行钢板表面缺陷检测可有效避免漏检错检。

6.3.12 构件平面相对垂直度, 如工字钢翼缘与腹板垂直度, 可拟合被检测平面, 根据平面法向量夹角计算垂直度。

6.3.13 铰平面对轴线垂直度, 应计算铰平面所在主平面法向量, 根据主平面法向量与轴线方向向量夹角计算垂直度。

6.3.14 本条主要针对角焊缝尺寸检测。进行切片后, 应根据边缘特征提取特征信息, 如图 2 所示, 包括母材边缘线交点、母材与焊缝交点以及焊缝外边缘点。其中母材边缘线交点可根据母材边缘点拟合边缘线后计算交点, 母材与焊缝交点可采用角点提取算法进行提取。根据焊缝形状, 计算焊缝厚度、焊缝计算厚度、凸

度或凹度、焊脚尺寸。当需考虑坡口尺寸时，应在焊接前对母材坡口尺寸进行检测。

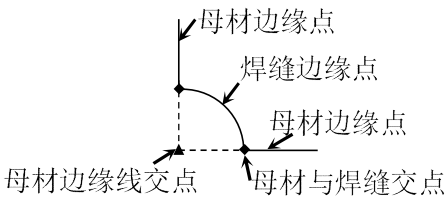


图 2 角焊缝母材边缘示意

6.3.15 有构件设计模型时，应将被连接构件与设计模型对齐，对齐后提取螺栓孔特征，当点云包含螺栓孔孔壁时，可采用圆柱拟合或圆拟合的方式进行孔心及半径提取，当孔壁数据缺失时，可将点云投影为图像，并采用图像识别的方式提取螺栓孔孔心位置及半径。当不具有构件设计模型时，不共线的三个控制点可确定空间坐标系，控制点应当尽量分散。

螺栓通孔直径可参考下式计算（图 3）：

$$D_s = \begin{cases} \min(2 \times R_1, 2 \times R_2) - \Delta C + |R_1 - R_2| & \Delta C \geq |R_1 - R_2| \\ \min(2 \times R_1, 2 \times R_2) & \Delta C \leq |R_1 - R_2| \end{cases} \quad (1)$$

式中： D_s ——螺栓孔允许通过的最大螺栓直径；

R_1, R_2 ——被连接的两个构件对应螺栓孔的半径；

ΔC ——被连接的两个构件对应螺栓孔孔心间距。

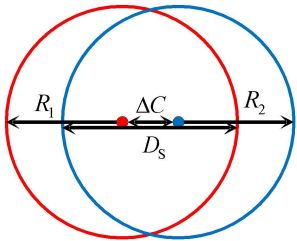


图 3 螺栓通孔直径计算示意

6.3.16 为避免焊缝集中，型材应错缝焊接。根据实际检测需求，以 H 型钢为例，错缝处翼缘边缘与腹板边缘为空间垂直的直线，以直线间距作为错缝距离。

6.3.17 为使桁架杆件只产生轴力，应对桁架杆件轴线交点偏移量进行检测。根据实际检测需求，对相交杆件轴线进行提取，计算轴线交点与理想铰几何中心偏差。

6.3.19 为避免下弦杆的平面外弯曲对桁架预拱度检测产生影响，宜通过下弦杆和腹杆确定桁架平面，然后计算下弦杆的预拱度。

7 房屋现场尺寸检测

7.1 一般规定

7.1.1 房屋现场尺寸检测时，若施工允许偏差值小于点云精度及最大点间距，则检测结果可靠性不足，应根据相关规范的施工允许偏差值确定点云质量等级。

7.1.2 与人工检测方式相比，采用点云进行房屋现场尺寸检测时，增加检查数量仅增加算力消耗而不增加人力成本。为体现采用点云进行房屋现场尺寸检测的优势，应按本条规定的检测数量进行检测，其余相关规定应参考现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204。对于大空间房屋，墙与板的面积一般较大，为避免墙或板的表面点云在平面拟合时由于面积过大造成标准参考面拟合误差较大，应进行检测面划分。

7.1.6 参考现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的平面平整度检测方法进行检测时，应在点云上模拟采用靠尺进行检测的过程，并采取随机抽样检测。本规程不对检测算法进行规定，且靠尺宽度范围不做限定，但应保证模拟靠尺的长度不小于相应规范中要求的靠尺长度。当模拟靠尺的范围超过表面点云的边界时，可对超出部分以 0 偏差值进行扩充。

7.1.7 与人工检测方法不同，点云可表现出对象的整体几何性质。为反映平面的全局垂直度，本条建议采用平面点云的法向量进行全局垂直度计算。参考现行国家规范《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的垂直度检测方法，本条规定局部垂直度计算时，应保证模拟靠尺的方向垂直于检测平面与地面的交线，且保证两端端点都在平面点云的范围内。

7.1.10 对于非常规几何体，宜利用骨架收缩算法获取粗略中心线。可进行多次修正，提高轴线提取精度。

7.1.11 非变形部位，指在结构主体或构件变形方向基本无变形或相对于检测对象变形量可以忽略不计的部位。例如，进行结构主体变形检测时，可选择环境点云配准，也可以选择结构底部点云进行配准；进行梁挠度检测时，可选择结构柱的点云配准，也可以选择梁端节点部位的点云进行配准。

7.2 平面平整度检测

7.2.1 如图 4 所示，本条中的整体点云指待检测的平面点云，点云候选区域指检测点可选取的区域。在养护过程中，平面边缘处的混凝土受膨胀或收缩的影响，

将产生局部变形；若在平面拟合时，将这部分点云纳入计算会影响平面拟合的效果。考虑阴阳角的邻域计算范围后，本条将用于检测的点云候选区域范围设置为距离边界不应低于 20cm。

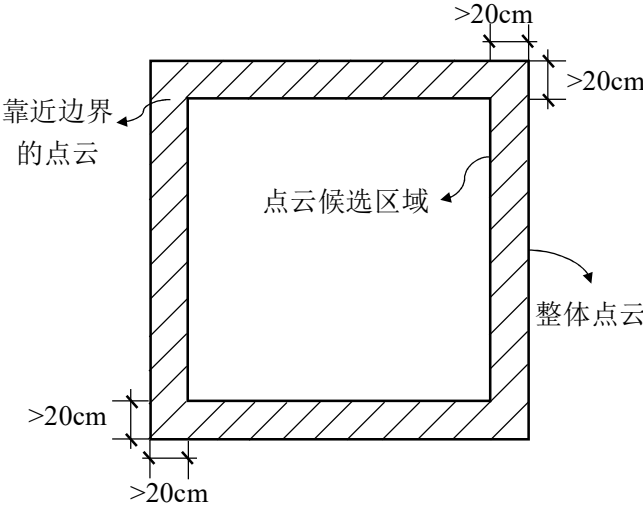


图 4 用于检测的点云候选区域

7.2.2 根据现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 中表 8.3.2 与表 9.3.9 规定的现浇结构与装配式结构混凝土表面平整度的检验方法，进行平整度检测时，应在点云上模拟长度为 2m 的靠尺进行检测。

7.2.3 为充分发挥数字化检测的优势，本条建议对任意检测点采用“米”字型检测方式，以模拟靠尺的中点位置作为记录的检测点。

7.2.4 根据平面平整度人工检测的经验，检测数量根据不同平面长度设置为 1~5 次，因此本条规定基于点云的平面平整度检测不应小于 3 次。

7.3 墙面垂直度检测

7.3.3 根据墙面局部垂直度人工检测的经验，检测数量根据不同墙面长度设置为 1~5 次，因此本条规定基于点云的墙面局部垂直度检测不应小于 3 次。

7.3.4 阴阳角的方正性取决于检测点两侧邻域范围内的点云法向量。根据平面平整度与墙面垂直度的点云候选区域确定要求，本条规定在相邻两个待测墙面点云上，对于任一检测点，两个墙面的局部法向量通过距离检测点 20cm 范围内的点云进行计算。

7.4 施工尺寸偏差检测

7.4.1 施工后构件绝对位置检测为施工坐标系下的构件位置检测，应至少选择 3 个非共线的现场控制点进行构件点云或特征点的坐标转换。

7.4.3 现浇结构模板底模相对高差与设计不符时，将影响楼板厚度或降板高度，对底模相对高差检测即对底模平面之间的距离检测。

7.4.4 现浇结构模板表面平整度检测为平面平整度检测，根据平面平整度检测方法进行。

7.4.5 当设计图纸规定了模板预拱度时，可只进行模板预拱度的检测，当设计图纸未规定模板起拱高度时，应当增加梁板净跨检测项，确定模板起拱高度是否符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 等相关规范的要求。

若以模板顶面点云拟合的平面作为基准面，可能造成模板顶面点云分布在基准面两侧，预拱度计算时应将基准平面两侧最远点云距离叠加。当模板顶面点云密度分布不均匀时，拟合的平面可能与水平面产生较大夹角，计算得到的预拱度大小将出现较大偏差。因此，以模板顶面与侧面边缘点拟合的平面作为基准平面，可保证模板顶面点云均位于基准平面同侧，直接计算模板顶面点云至基准平面的最大距离即可。

7.4.6 当同向相邻的平行预留钢筋间距存在偏差或预留钢筋之间有相交趋势时，均会影响钢筋的锚固性能。因此对每根钢筋取多个检测点进行计算，以避免钢筋不平行时间距检测的局限性。由于预留钢筋多为带肋钢筋，且直径较小，采用高精度的点云数据拟合钢筋柱体成本过高，宜采用直线拟合的方式表征钢筋几何特征，即使直线拟合在钢筋直径内发生偏差，也能通过均匀取检测点的方式提高检测精度。

7.4.8 室内空间尺寸检测项为开间、进深以及层高，因此采用平面间距检测的方式进行尺寸检测。参考现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收标准》GB50204 中表 8.3.2 的相关规定，层高允许偏差为 $\pm 10\text{mm}$ ；柱、墙、梁的轴线位置偏差许可误差为 8mm ，且柱、梁、板、墙截面尺寸允许偏差为 $+10\text{mm}$ 与 -5mm ；因此结合目前实测实量行业常用规定，表 7.3.8 中的室内净高度允许偏差设置为 -20mm ，允许极差设置为 20mm ；室内开间进深允许偏差设置为 $\pm 15\text{mm}$ ，允许极差设置为 20mm 。

7.4.9 当柱垂直度产生偏差时，将直接影响建筑结构的稳定性和承载能力，因此宜提取轴线，并计算轴线与重力方向的夹角。

7.4.10 混凝土预制构件安装位置检测，包含绝对位置检测和相对位置检测，进行绝对位置检测时，应将点云转换至施工坐标系。结构设计时，预制构件定位依靠

轴线进行表示，因此检测过程中宜提取构件轴线，提取轴线后可进行相对位置安装偏差检测。

7.4.11 梁、桁架等直接承担竖向荷载的构件检测时，应提取梁、桁架轴线方向的几何特征，计算其与重力方向的垂直度。

7.4.12 标高检测为施工坐标系下的绝对高度检测，因此需将点云转换至施工坐标系。

7.3.13 对于板类构件如墙板和楼板等，其接缝边缘可能不平行。为充分检测接缝宽度变化，在一侧边缘线上等距离取点，参考现行国家行业标准《装配式混凝土结构技术规程》JGJ1，应同时规定接缝最小宽度和最大宽度。

7.4.14 钢结构主体较为复杂，主体垂直度和平面弯曲宜与标准模型对比。整体垂直度检测时，计算柱顶偏差，整体平面弯曲检测时，计算柱底与轴网偏差，具体计算方法应参照现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205。

7.4.15 钢梁平面内弯曲时翼缘弯曲变形明显，选择腹板平面作为基准面，计算翼缘点云矢高。

7.4.16 钢梁平面外弯曲时腹板弯曲变形明显，选择翼缘平面作为基准面，计算腹板点云矢高。

7.4.17 建筑楼板需要降板时主次梁表面产生相对高差，宜选择主次梁上表面作为检测平面，计算平面之间的距离。

7.5 结构变形监测

7.5.1 本条为基于点云进行结构变形监测的基本要求：

1. 结构变形监测为一套完整的测量监测体系，当前仅能对其中部分监测项进行基于点云的监测。应对基于点云的监测过程制定详细方案，确保结构在施工和使用过程中的性能与安全。首次观测值是整个变形测量的基础数据，应进行两次初始状态监测，保证后续测量成果具有足够的可靠性。极限误差取点云平面中误差的2倍。

2. 结构变形监测具有强时间性，在监测作业开始前应根据相关工程资料、设计图纸等进行详细的监测方案设计。

3. 根据综合因素确定监测周期有助于异常变形早发现、早处置。监测过程为一个动态的验证过程，当监测期间发现建筑产生异常变形时，宜缩短监测周期。

4. 每次变形测量在尽可能短的时间内完成，可以保证同期的变形观测数据在时态上保持基本一致；选择相同的数据采集设备、方案及相同的数据处理方式

以及固定监测人员，是为了尽可能地减弱系统误差影响，提高观测精度，保证成果质量；对监测期间地环境因素进行记录有利于后续的数据分析，有助于后续监测变形预测和监测结果的溯源。

5. 测量仪器设备即使在检定有效期内，由于搬动或磕碰等引起的振动因素也可能导致仪器设备的部分技术指标发生变化，使变形观测成果达不到设计的要求，因此每期观测前应对所使用的仪器和设备进行检查、标定和矫正，并做好记录。

6. 为保证建筑及其周边环境在施工和运营阶段的安全，当变形测量过程中出现异常情况时，必须立即通知建筑单位和施工单位采取相应措施。

7.5.2 由于建筑发生变形，每期变形监测前后，选择固定点对变形前后数据进行坐标转换。

7.6 机电管线及预埋预留检测

7.6.1 对导管、管槽等设备、配件进行转弯半径的限制，可避免内部设备发生变形、破裂，同时便于穿线。因此在计算转弯半径时，应以内缘最小半径为准。

7.6.2 柜、台、箱、盘安全间距检测，为相邻设备的相邻面间距检测，因此按照平面之间的距离检测方法进行。

7.6.3 柜、台、箱、盘垂直度检测，为设备各立面垂直度检测，因此按照平面垂直度检测方法进行。

7.6.4 机架、母线槽等设备、配件垂直度和水平度检测，为设备对应平面的垂直度、水平度检测，因此按照平面全局垂直度和水平度检测方法进行。

7.6.5 母槽支架圆钢吊架可视为规则的圆柱形，因此按照截面尺寸检测方法进行。

7.6.6 伸缩节为不规则构件，因此在检测前需对伸缩节进行识别，如今点云神经网络技术发展已经较为成熟，可通过神经网络对伸缩节进行识别和分割，在条件具备的情况下应优先考虑网络识别，减少人工识别工作量。相对于伸缩节间距，伸缩节尺寸可忽略不计，为方便计算，取伸缩节点云几何中点作为伸缩节位置。

7.6.7 导管具有明显的轴线信息，导管入口至基础面的距离，可计算导管轴线点至基础平面距离，在选择导管点云时，应尽量选择入口处导管点云，以确保检测结果的可靠性。

7.6.8 电器设备包含总类较多、形状各异，悬挂电器的对地距离检测是避免电器设备对人体产生伤害，宜直接计算电器点云至地面平面的最小距离，即电器设备对地的最低点。

7.6.9 霓虹灯与建筑表面的距离关系，为直线与平面距离关系，宜提取灯管轴线，计算与建筑表面的最小距离，同时考虑灯管体积，宜扣除灯管半径。

7.6.10 照明开关数量较多，相对于整个场景而言体积较小，宜首先进行分割与识别，并计算照明开关与建筑物关键部位如门框、楼板、顶板距离。

7.6.11 支持件、支架、吊架等支撑配件数量较多，相对于整个场景而言体积较小，宜首先进行识别与分割。支撑配件的等效集中荷载位置通常为支撑件中点，以支撑件中点作为支撑件位置，可能产生的位置描述偏差，远小于支撑件间距。

7.6.12 灯柱地脚螺栓布置方式较为简单，宜对螺杆间距与螺孔间距进行检测。

7.6.13 接地模块埋置深度检测，应获取覆土前的点云，计算接地模块顶面与地面之间的距离。由于接地模块的水平度偏差可能较大，在计算平面间距离时，检测点应选择接地模块顶面上的点。

7.6.14 接地模块数量较多，相较于整个场景而言其体积占比较小，对其间距进行检测时，宜首先进行识别与分割。相较于接地模块间距而言，接地模块的长度不可忽略，计算埋置间距时宜考虑接地模块长度。

7.6.15 导管敷设沟槽截面为开口的多边形，宜以开口角点作为截面角点，进行轴线点的提取和截面尺寸检测。

8 竣工数字可视化模型

8.1 精细度级别定义

8.1.1 竣工数字可视化模型是指能够通过分析点云信息得到的几何模型，因此本条指代的精细度为几何表达程度。

8.1.2 通过分析点云能够获得的信息一般包括几何尺寸、空间位置、语义、纹理色彩，精细度级别根据信息获取的难易程度确定。

8.1.3 表 8.1.3 中列出的应用项目仅为基于点云重建获得的数字可视化模型在建筑行业中的常见应用，其他的相关应用应由项目负责人根据实际项目需求参考表 8.1.3 确定。

8.1.5 根据现行国家标准《城市地下空间三维建模技术规范》GB/T41447 的相关规定，与安全相关的设施在几何尺度上应至少包含表面基本几何形态。因此，按本规程第 8.1.2 条的精细度等级划分结果，与安全相关的设施不应低于 LOD3。

8.2 模型三维重建

8.2.3 对于规则模型如墙壁等，宜根据点云拟合或者通过投影截面拉伸的方式进行模型重建。对于规则曲面模型如管道等，宜利用交互建模的方式进行模型重建。对于不规则曲面模型，宜先利用显式（如三角网格）或隐式（符号距离函数）表述方法对点云曲面进行描述，再进行模型重建。

若点云因部分缺失无法获取表面模型时，宜根据可见部分进行推算，以补全表面模型孔洞。建立的表面模型应进行边修补、光滑化等处理以提高模型质量。

8.2.4 建筑物主体中的规则模型，宜通过参数化方法进行模型重建。对于树木等不规则点云，宜使用表面模型等非参数化方法进行模型重建。

9 成果归档

9.1 一般规定

9.1.1 记录点云来源和精度等级，确保检测报告结果可靠。

9.1.2 应记录检测结果及检测人员，便于检测结果溯源。

9.1.3 本条规定了检测报告应包含的内容。对数据处理流程和技术处理框架进行记录，有利于检测过程公开透明，提高检测报告结果可靠性。

9.1.4 基于点云的建筑尺寸数字化检测，各检测项均应有明确的数值指标。

9.1.5 检测报告内容真实是检测报告的基本要求，检测报告表述不准确，关键指标信息的错误传达，易造成资源浪费或引发安全隐患。

9.2 归档内容

9.2.1 成果清单是检测成果自查以及归档的目录；检测报告是检测成果的核心内容；原始点云与重要中间过程点云应进行存档，便于后期校验或审查；其它相关资料根据具体需求（特殊重要结构、规范有额外要求的结构、业主特殊要求等）进行存档。