

T/CSOE

中国光学工程学会团体标准

T/CSOE 0007—2025

用于大范围多视场拼接测量的结构光三维 测量系统校准方法

Calibration Method for Structured Light 3D Measurement System for Large-Scale
Stitching Measurement

（报批稿）

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国光学工程学会 发布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 球棒标准器校准法 1

 4.1 适用范围 1

 4.2 校准原理 1

 4.3 校准装置 2

 4.4 校准条件 2

 4.5 校准方法 2

 4.6 测量不确定度 3

5 球面靶标校准法 3

 5.1 适用范围 3

 5.2 校准原理 3

 5.3 校准装置 4

 5.4 校准条件 4

 5.5 校准方法 4

 5.6 测量不确定度 4

附 录 A （资料性） 不确定度评定示例 6

 A.1 测量原理 6

 A.2 测量模型 6

 A.3 合成标准不确定度计算公式 6

 A.4 测量重复性引入的标准不确定度 $u(L_{\text{meas},i})$ 6

 A.5 标准器具引入标准不确定度分量 $u(L_{\text{ref}})$ 6

 A.6 合成不确定度 7

 A.7 扩展不确定度 7

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国光学工程学会提出并归口。

本文件起草单位：北京航空航天大学、思看科技（杭州）股份有限公司、北京航天计量测试技术研究所、成都飞机工业（集团）有限责任公司、北京长城计量测试技术研究所、新拓三维技术（西安）有限公司等。

本文件主要起草人：赵慧洁、李本军、姜宏志、杨永军、刘华、王江峰、李旭东、朱绪胜、方乐、刘勇、王继虎、唐正宗、任茂栋等。

用于大范围多视场拼接测量的结构光三维测量系统校准方法

1 范围

本文件规定了用于大范围多视场拼接测量的结构光三维测量系统球棒标准器校准法和球面靶标校准法。

本标准适用于大范围多视场拼接距离测量的结构光三维测量系统测量精度的校准。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 16857 产品几何级数规范（GPS）坐标测量系统（CMS）的验收检测和复检检测

JJF1001 通用计量术语及定义

JJF1951 基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范

3 术语和定义

GB/T 16857、JJF1001以及JJF1951界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

结构光三维测量系统 structured light 3D measurement system

通过投射结构光图案至物体表面，并利用相机捕获物体表面的结构光图像，结合三角测量原理计算物体表面三维坐标的测量系统。

3.2

全局定位系统 global positioning system

能够对结构光三维测量系统实现跟踪定位，从而完成多视场数据拼接的系统。

注：

- 1) 由一个或多个视场范围相对较大的三维测量系统组成；
- 2) 包括但不限于视觉/摄影测量系统、激光跟踪仪等。

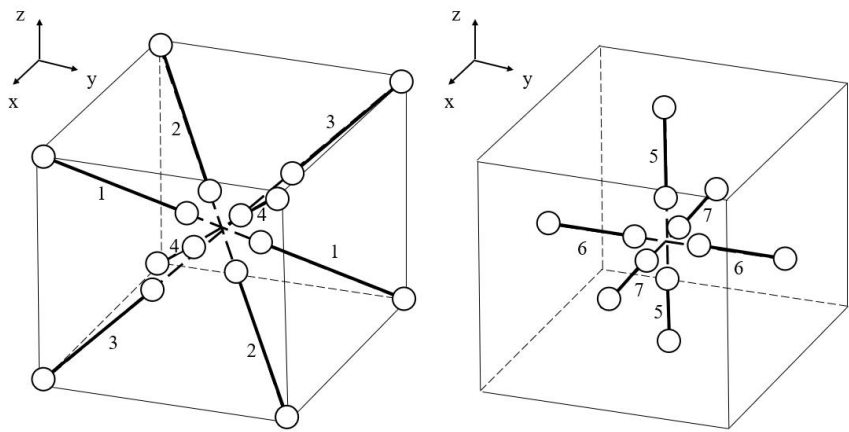
4 球棒标准器校准法

4.1 适用范围

球棒标准器校准法适用于结构光三维测量系统针对大范围多视场拼接测量时距离探测能力的校准，由球心距测量示值误差 SD_B 表征。

4.2 校准原理

结构光三维测量系统测量空间简化为长方体，如图1所示。球心距测量示值误差 SD_B 应在整个测量范围 $n=7$ 个不同位置分别测量。建议按照图1所示布置和测量标准器，每个位置上标准球棒的分布范围应至少覆盖该方向上测量空间长度的80%。单个标准球棒长度不足时，可以在空间首尾衔接、分时摆放多个位置；



1 沿测量空间的体对角线方向布置（1、2、3和4），覆盖长度不小于体对角线的80%；
2 沿测量空间边的平行方向布置（5、6和7），覆盖长度不小于边的80%。

图1 球棒的推荐排列

对于所有测量位置获取点云后，用定半径拟合法，拟合所有球心位置。计算球棒在每个位置的球心距 $L_{\text{meas},i}$ ，球心距测量示值误差 SD_{Bi} ，是测量值 $L_{\text{meas},i}$ 与被测长度校准值 L_{ref} 之差，按下式计算：

$$SD_{Bi} = L_{\text{meas},i} - L_{\text{ref}} \dots\dots\dots (1)$$

取各位置中绝对值最大者，作为球心距测量示值误差 SD_B 的测量结果，按下式计算：

$$SD_B = \text{MAX}(|SD_{Bi}|) \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 i ——测量位置的序号， $i = 1, 2, \dots, n$

4.3 校准装置

- 校准采用标准球棒具有下列要求：
- a) 校准采用标准球棒应由陶瓷、钢、铝或其他刚性材料制成。
 - b) 标准球棒球心距不小于 1000mm，球径误差测量不确定度 $\leq 2\mu\text{m}(k=2)$ ，球心距误差测量不确定度 $\leq 10\mu\text{m}(k=2)$ 。

4.4 校准条件

4.4.1 环境条件

- 校准环境条件包括温度和湿度：
- a) 温度：符合制造商仪器使用说明书的规定。
 - b) 湿度：相对湿度 $< 75\%RH$ 。

4.4.2 校准用软件

- 校准用软件包括数据采集、数据处理和评价分析软件。
- a) 数据采集和数据处理软件使用设备配套软件，并按照制造商说明书设定图像采集处理的点间距、快门时间、稀疏点云参数、剔除率、拟合算法等，且测量结果应统一输出为点云。
 - b) 评价分析软件具有点云几何量特征提取功能，特征包括但不限于球直径、球形状探测误差、球心坐标、平面度、点到面距离、平面测量完整率，且支持输入数据类型包含点云。

注：

- 1) 剔除率设定为 0.3%；
- 2) 除制造商明确规定外，拟合算法宜采用最小二乘法。

4.5 校准方法

4.5.1 校准前准备

校准前作如下准备：

- 清洁结构光三维测量系统和标准器，不应有影响校准操作的多余物；
- 结构光三维测量系统的配置与安装；
- 对操作模式进行设置，包括照明的类型和亮度、测量范围、系统用传感器的类型、数量和分布等；
- 结构光三维测量系统标定。

4.5.2 校准步骤

校准步骤如下：

- 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
- 将标准球棒按图 1 所示依次摆放 7 个位置；
- 每个位置测量不少于 5 次，分别计算球心距测量示值误差及其算术平均值作为该位置的球心距测量示值误差 SD_{Bi} ；
- 计算球心距测量示值误差 SD_B 。

4.6 测量不确定度

按要求校准时，在不考虑被校准仪器测量重复性引入的标准不确定度时，球棒标准器校准法的测量不确定度一般不大于 $15\mu\text{m}$ ($k=2$)。用于大尺寸拼接测量的结构光三维测量系统校准结果的测量不确定度评定示例见附录A。

5 球面靶标校准法

5.1 适用范围

球面靶标校准法适用于结构光三维测量系统针对大范围多视场拼接测量时距离探测能力的校准，由球心距测量示值误差 SD_T 表征。

5.2 校准原理

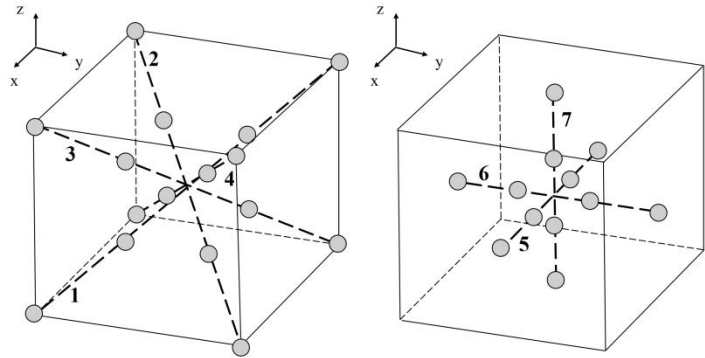
结构光三维测量系统测量空间简化为长方体，如图2所示。在测量空间内布置球面靶标，利用激光跟踪仪对球面靶标中心点位置进行测量。激光跟踪仪安装在球面靶标中心点连线位置的一端，调整出光中心到球面靶标中心线位置，测量球面靶标球心坐标，作为参考点。

球心距测量示值误差 SD_T 应在大尺寸拼接测量系统空间测量范围内的7个不同方位（位置和方向）分别测量。建议按照图2所示的7个方位上分别布置4个球面靶标，共布置28个球面靶标，其分布范围应至少覆盖测量空间对应方向长度的80%。

表 1 测量空间的不同方向

序号	在测量空间的方向	必需或默认
1	沿测量空间对角线，从(1, 0, 0)到(0, 1, 1)	必需
2	沿测量空间对角线，从(1, 1, 0)到(0, 0, 1)	必需
3	沿测量空间对角线，从(0, 1, 0)到(1, 0, 1)	必需
4	沿测量空间对角线，从(0, 0, 0)到(1, 1, 1)	必需
5	平行于空间拼接测量范围的轴线，从(0, 1/2, 1/2)到(1, 1/2, 1/2)	默认
6	平行于空间拼接测量范围的轴线，从(1/2, 0, 1/2)到(1/2, 1, 1/2)	默认
7	平行于空间拼接测量范围的轴线，从(1/2, 1/2, 0)到(1/2, 1/2, 1)	默认

注：表中参数基于假设大尺寸拼接测量系统空间测量范围的对角坐标假设为(0, 0, 0)和(1, 1, 1)。



1 沿测量空间的体对角线方向布置（1、2、3和4），每个方向均匀布置4个球面靶标，长度不小于体对角线的80%；
2 沿测量空间边的平行方向布置（5、6和7），每个方向均匀布置4个球面靶标，长度不小于边的80%。

图2 球面靶标的推荐排列

拼接测量得到每个球面靶标表面三维点云，用定半径拟合法，拟合所有球心位置，每个方位上分别取靠近测量空间边缘的一对球面靶标和靠近测量空间中心的一对球面靶标计算出2组球心距。在7个方位上，共计算出 $n=14$ 组球心距。以激光跟踪仪测得的球心距 $L_{\text{ref},i}$ 为参考，球心距示值误差 SD_{Ti} 是测量值 $L_{\text{meas},i}$ 与参考值 $L_{\text{ref},i}$ 之差，按下式计算：

$$SD_{Ti} = L_{\text{meas},i} - L_{\text{ref},i} \dots\dots\dots (1)$$

取绝对值最大值作为球心距示值误差 SD_T 的测量结果，按下式计算：

$$SD_T = \text{MAX}(|SD_{Ti}|) \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 i ——球心距的序号， $i = 1, 2, \dots, n$ 。

5.3 校准装置

- 校准采用装置具有下列要求：
- a) 在测量空间内布置 28 个球面靶标，球面靶标分布范围至少能够覆盖标称测量空间每条边长的 80%。使用激光跟踪仪测得的球面靶标球心坐标作为校准用参考；
 - b) 球面靶标球心与光学中心之间的误差不大于 $3\mu\text{m}$ ；
 - c) 激光跟踪仪的距离精度不低于 $0.5\mu\text{m/m}$ 。

5.4 校准条件

符合4.4校准条件中的要求。

5.5 校准方法

5.5.1 校准前准备

符合4.5.1校准准备中的要求。

5.5.2 校准步骤

- 校准步骤如下：
- a) 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
 - b) 使用被校结构光三维测量系统测量按照图2所示在7个方位上测量28个球面靶标，共14个位置；
 - d) 每个位置测量不少于 5 次，分别计算球心距示值误差及其算术平均值作为该组球心距的球心距示值误差 SD_{Ti} ；
 - e) 计算球心距测量示值误差 SD_T 。

5.6 测量不确定度

按要求进行校准时,在不考虑被校准仪器测量重复性引入的标准不确定度时,球面靶标校准法的测量不确定度一般不大于 $(15+0.5\times L)\mu\text{m}$ ($k=2$), L 为激光跟踪仪测量球面靶标时的距离值。

附录 A (资料性) 不确定度评定示例

A.1 测量原理

选用国内某用于大范围多视场拼接测量的结构光三维测量系统，其测量空间范围 $4\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ 。测量采用标准球棒，按照 4.2 的原理，在整个测量范围 $n=7$ 个不同位置分别测量，通过首尾衔接、分时摆放，使得每个位置上标准球棒的分布范围应至少覆盖该方向上测量空间长度的 80%。标准球棒参考球心距为 1800.342mm ，测量不确定度为 $8.0\mu\text{m}$ ，线膨胀系数为 $(8.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，测量环境温度 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，温度测量误差最大允许误差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，结构光三维测量系统具有温度补偿功能。无其他明显的影响因素。

A.2 测量模型

$$SD_B = \text{MAX}(|SD_{Bi}|) = \text{MAX}(|L_{\text{meas},i} - L_{\text{ref}}|) \dots\dots\dots (\text{A.1})$$

式中：

$L_{\text{meas},i}$ ——第 i 个位置测量球心距测量值，mm；

L_{ref} ——标准球棒球心距的参考值，mm。

A.3 合成标准不确定度计算公式

$$u_c(SD_B) = \text{MAX}[u(SD_{Bi})] = \text{MAX}[\sqrt{u^2(L_{\text{meas},i}) + u^2(L_{\text{ref}})}] \dots\dots\dots (\text{A.2})$$

因为各不确定度分量互不相关，依不确定度传播率：

$$u_c^2(SD_B) = u^2(L_{\text{meas},i}) + u^2(L_{\text{ref}}) \dots\dots\dots (\text{A.3})$$

式中：

$u(L_{\text{meas},i})$ ——测量重复性引入的标准不确定度；

$u(L_{\text{ref}})$ ——标准器具引入的标准不确定度。

A.4 测量重复性引入的标准不确定度 $u(L_{\text{meas},i})$

通过 5 次重复测量固定标准球棒，则测量重复性引入的标准不确定度

$$u(L_{\text{meas},i}) = \frac{s(L_{\text{meas},i})}{\sqrt{5}} = 3.0\mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.4})$$

式中：

$s(L_{\text{meas},i})$ ——多次重复测量球直径的实验标准偏差。

A.5 标准器具引入标准不确定度分量 $u(L_{\text{ref}})$

A.5.1 球心距参考值引入的标准不确定度分量

球棒球心距参考值的测量不确定为 $8\mu\text{m}$ ，包含因子 $k_1 = 2$ ，则

$$u_1(L_{\text{ref}}) = \frac{8\mu\text{m}}{2} = 4.0\mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.5})$$

A.5.2 球棒温度变化引入的标准不确定度分量

球棒的线膨胀系数为 $(8 \pm 1.0) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，长度为 1800.342mm，温度测量误差最大允许误差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，按均匀分布处理，包含因子 $k_2 = \sqrt{3}$ ，则

$$u_2(L_{\text{ref}}) = \frac{1800.342\text{mm} \times 8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.5^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \approx 4.16 \mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.6})$$

A.5.3 球的线膨胀系数测量误差引入的标准不确定度分量

球的线膨胀系数为 $(8 \pm 1.0) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，半宽区间 $1.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ 内服从均匀分布，测量环境温度偏离标准温度不超过 5°C ，包含因子 $k_3 = \sqrt{6}$ ，则：

$$u_3(L_{\text{ref}}) = \frac{1800.342\text{mm} \times 5^\circ\text{C} \times 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{6}} \approx 3.68 \mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.7})$$

A.5.4 合成标准器具引入的标准不确定度

各不确定度分量互不相关，合成标准器具引入的标准不确定度为：

$$u(L_{\text{ref}}) = \sqrt{u_1^2(L_{\text{ref}}) + u_2^2(L_{\text{ref}}) + u_3^2(L_{\text{ref}})} = \sqrt{4.0^2 + 4.16^2 + 3.68^2} \approx 6.8 \mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.8})$$

A.6 合成不确定度

各不确定度互不相关，合成不确定度为：

$$u_c(SD_B) = \sqrt{u^2(L_{\text{meas},i}) + u^2(L_{\text{ref}})} = \sqrt{3.0^2 + 6.8^2} \approx 7.5 \mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.9})$$

A.7 扩展不确定度

$$U = k u_c(SD_B) = 15 \mu\text{m}, \quad k = 2 \dots\dots\dots (\text{A.10})$$
