

T/CSOE

中国光学工程学会团体标准

T/CSOE 0010—2025

融合坐标测量机的结构光三维测量系统校准方法

Calibration Method for Structured Light 3D Measurement System Integrated with
Coordinate Measuring Machine (CMM)

（报批稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

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 球形状尺寸探测误差校准法 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 3

 4.6 测量不确定度 3

5 球心距测量示值误差校准法 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 测量不确定度 4

6 联合测量误差校准法 5

 6.1 适用范围 5

 6.2 校准原理 5

 6.3 校准装置 5

 6.4 校准条件 5

 6.5 校准方法 5

 6.6 测量不确定度 6

附 录 A （资料性） 不确定度评定示例 7

 A.1 测量方法 7

 A.2 测量模型 7

 A.3 合成标准不确定度计算公式 7

 A.4 测量重复性引入的标准不确定度 $u(D_i)$ 7

 A.5 标准器具引入的标准不确定度 $u(D)$ 7

 A.6 合成不确定度 8

 A.7 扩展不确定度 8

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、北京航空精密机械研究所、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、海克斯康制造智能技术（青岛）有限公司。

本文件主要起草人：赵慧洁、徐国柱、姜宏志、李本军、李旭东、杨永军、封善斋、王帼媛、刘华、孙东辰、刘勇、聂海平、王继虎等。

融合坐标测量机的结构光三维测量系统校准方法

1 范围

本文件规定了融合坐标测量机的结构光三维测量系统校准的球形状尺寸探测误差校准法、球心距测量示值误差校准法和联合测量误差校准法。

本文件适用于融合坐标测量机的结构光三维测量系统校准。

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。

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1064 坐标测量机校准规范

JJF 1071 国家计量校准规范编写规则

JJF 1951 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

JJF1001、JJF 1064、JJF 1071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

融合坐标测量机的结构光三维测量系统 structured light 3D measurement system integrating coordinate measuring machine

由线或面结构光三维测量系统和坐标测量机组成，通过将结构光三维测量系统安装在坐标测量机测量座末端，由坐标测量机带动至不同视点，实现被测对象表面点云完整测量的系统。简称融合测量系统。

3.3

联合测量误差 joint measurement error

使用坐标测量机接触式测量系统和融合测量系统，分别对被测对象表面测量得到相应的三维坐标，比对二者之间的坐标偏差。

4 球形状尺寸探测误差校准法

4.1 适用范围

本校准方法适用于融合坐标测量机的结构光三维测量系统对曲面探测能力的校准，由球形状探测误差 P_F 和尺寸探测误差 P_S 表征。

4.2 校准原理

将检测球安装在融合测量系统测量空间内的任意位置，使用融合测量系统在多个视场对检测球测量，测量视点分布位置宜由用户规定，用户没有规定，采用下列测量视点分布（见图1）：

- 在检测球的极点一视点；
- 极点下45°四视点，均匀分布；
- 极点下90°四视点，均匀分布。

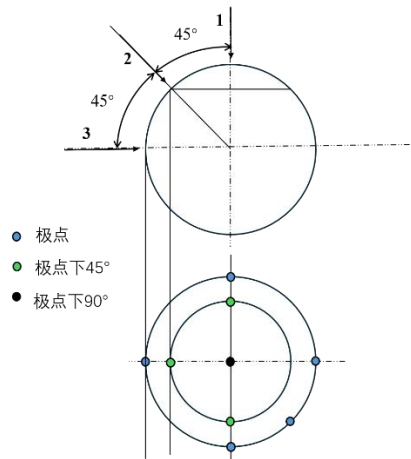


图 1 测量系统的推荐视场

将结构光三维测量系统获取的单视场点云拼接至融合测量系统全局坐标系,拼接后的测量点云宜覆盖检测球至少半个球以上。

对检测球表面测量点云进行球面拟合,计算拟合球心和半径 r_i ,计算点云中所有点到拟合球心的距离 r_i 。球形状探测误差 P_F 按下式计算:

$$P_F = \max(r_i) - \min(r_i) \dots\dots\dots (1)$$

拟合球的直径 D_a 与测量球直径参考值 D_r 之间的差为尺寸探测误差 P_S 按下式计算:

$$P_S = D_a - D_r \dots\dots\dots (2)$$

式中:

i ——测量点云的点序号, $i=1,2,3,\dots,9$ 。

4.3 校准装置

该校准法的校准装置要求:

- a) 检测球:用于校准探测误差及联合测量误差。直径和形状参考参考现有标准 JJF 1064,作为校准参考值。
- b) 材质:包括亮光不锈钢球、哑光不锈钢球或哑光陶瓷球等。

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) 校准结果的温度参考值为 20℃,环境温度对 20℃的偏离及其变化引入不确定度分量,应在校准结果不确定度评定中确定。
- b) 环境条件的允许极限由用户规定,校准时的环境条件应控制在允许极限内。

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,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 校准准备

校准准备应采用制造商操作说明书规定的步骤，并应包括下列内容：

- a) 坐标测量机测量座与结构光三维测量系统的配置和组装；
- b) 融合测量系统启动/预热周期；
- c) 标准器的清洁程序；
- d) 融合测量系统标定程序。

4.5.2 校准步骤

形状探测误差及尺寸探测误差校准应按下列步骤完成：

- a) 融合测量系统的启动/预热；
- b) 按图1所示安装检测球位置；
- c) 使用融合测量系统测量检测球，重复测量不少于5次；
- d) 分别计算球形状探测误差及其算术平均值作为球形状探测误差 P_F ，分别计算尺寸探测误差及其算术平均值作为尺寸探测误差 P_S 。

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，形状尺寸探测误差校准法的测量不确定度一般不大于 $5\mu\text{m}$ ($k=2$)。形状尺寸探测误差校准法校准结果的不确定度评定示例见附录 A。

5 球心距测量示值误差校准法

5.1 适用范围

本校准方法适用于融合坐标测量机的结构光三维测量系统对距离探测能力的评定，由球心距测量示值误差 SD 表征。

5.2 校准原理

在允许的极限内，选择球列的 7 个方向和位置，按表 1 和图 2 所示的 7 个方向摆放。

表 1 测量空间不同方向

序号	测量空间方向	要求或缺省
1	沿测量空间对角线，从(1,0,0)到(0,1,1)	缺省
2	沿测量空间对角线，从(1,1,0)到(0,0,1)	缺省
3	沿测量空间对角线，从(0,1,0)到(1,0,1)	缺省
4	沿测量空间对角线，从(0,0,0)到(1,1,1)	缺省
5	平行于坐标测量机光栅，从(0,1/2,1/2)到(1,1/2,1/2)	用户要求
6	平行于坐标测量机光栅，从(1/2,0,1/2)到(1/2,1,1/2)	用户要求
7	平行于坐标测量机光栅，从(1/2,1/2,0)到(1/2,1/2,1)	用户要求

注：表中参数基于假设坐标测量机测量空间的坐标(X,Y,Z)在一个角为(0,0,0)，另一个对角为(1,1,1)。

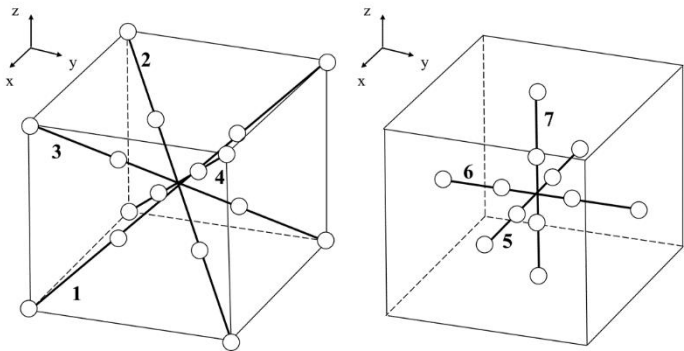


图 2 球列的推荐位置示意图

在7个不同位置，使用融合测量系统对球列测量，测量点云应覆盖球列上所有检测球，且每个检测球的测量点云至少覆盖半个球以上；

在测量点云上定半径拟合每个检测球的球心坐标，并计算对应的球心距 L_{ij} ，计算与球心距参考值 L_{0j} 之差，作为示值误差 SD_{ij} 。球心距测量示值误差 SD 可按下式计算：

$$SD = \max(|SD_{ij}|) = \max(|L_{ij} - L_{0j}|) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

i ——测量位置或方向的序号， $i=1,2,\dots,7$ ；

j ——球列上球心距的序号， $j=1,2,3\dots$ 。

5.3 校准装置

该校准法的校准装置要求：

- a) 球列：用于校准测量系统球心距测量示值误差。球心距不少于 5 个，最小长度为 30 mm，最大长度不小于测量系统测量空间对角线的 66%，其他长度应使测量长度间隔均匀。
- b) 球心距按计量技术规范校准，作为校准参考值。
- c) 当最大长度无法达到测量空间对角线的 66%时，应增加球列测量位置/方向，以覆盖空间对角线的 66%。

5.4 校准条件

符合4.4校准条件的规定。

5.4.1 校准准备

符合4.5.1校准准备的规定。

5.4.2 校准步骤

球心距测量示值误差校准应按下列步骤完成：

- a) 结构光三维测量系统和坐标测量机的启动/预热；
- b) 如图 2 所示依次选择球列的 7 个方向和位置；
- c) 使用融合测量系统测量球列，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位置的球心距示值误差 SD_{ij} ；
- d) 计算球心距测量示值误差 SD 。

5.5 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，球心距测量示值误差校准法的测量不确定度一般不大于 $10\mu\text{m}$ ($k=2$)。

6 联合测量误差校准法

6.1 适用范围

本校准方法适用于坐标测量机接触式测量系统和融合测量系统联合测量能力的评定，由联合测量误差 E 表征。

6.2 校准原理

在允许的极限内，选择检测球的5个位置，位置应至少覆盖测量空间水平方向上的80%，宜按图3布置检测球的位置。

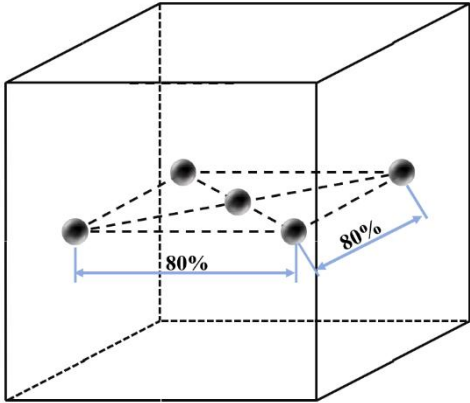


图 3 检测球的推荐位置示意图

在5个不同位置，分别使用坐标测量机接触式测量系统和融合测量系统对检测球测量，测量点云应至少覆盖检测球半个球以上；

分别对测量点云采用定半径拟合检测球的球心坐标，得到坐标测量机接触式测量系统对检测球球心坐标的测量值 $\mathbf{O}_{i0}$ 和融合测量系统对检测球球心坐标的测量值 $\mathbf{O}_i$ ，联合测量误差 E 按下式计算：

$$E = \max(\|\mathbf{O}_i - \mathbf{O}_{i0}\|) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

i ——测量位置的序号， $i = 1, 2, \dots, 5$ 。

6.3 校准装置

该校准法的校准装置要求：

- a) 检测球：用于校准探测误差及联合测量误差。直径和形状均已按计量技术规范校准，作为校准参考值。
- b) 材质：包括亮光不锈钢球、哑光不锈钢球或哑光陶瓷球等。

6.4 校准条件

符合4.4校准条件的规定。

6.5 校准方法

6.5.1 校准准备

符合4.5.1校准准备的规定。

6.5.2 校准步骤

联合测量误差校准应按下列步骤完成：

- a) 结构光三维测量系统和坐标测量机的启动/预热；
- b) 如图 3 所示依次选择 5 个不同的位置摆放检测球；

- c) 在每个位置，使用坐标测量机接触式测量系统测量检测球并拟合计算球心坐标 $\mathbf{O}_{i0}$ ；
- d) 在每个位置，使用融合测量系统测量检测球不少于 5 次，分别拟合计算球心坐标及其算术平均值作为该位置球心坐标的测量值 $\mathbf{O}_i$ ；
- e) 计算联合测量误差 E 。

6.6 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，联合测量误差校准法的测量不确定度一般不大于 $5\mu\text{m}$ ($k=2$)。

附录 A (资料性) 不确定度评定示例

A.1 测量方法

选用国内某用融合坐标测量机量的结构光三维测量系统，其单视角系统测量空间范围 400mm×200mm×200mm。选用直径 50mm 的球标准器。在测量范围内，按照 4.1 的方法，在多个视场对检测球测量。

球直径参考值为 49.850mm，测量不确定度为 2.0μm，线膨胀系数为 $(8.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。测量时环境温度 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，温度测量误差优于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，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

$$P_s = \text{MAX}(|P_{s_i}|) = \text{MAX}(|D_i - D|) \dots\dots\dots (\text{A.1})$$

式中：
 D_i ——第 i 次测量球尺寸测量值，mm；
 D ——标准球球尺寸的参考值，mm。

A.3 合成标准不确定度计算公式

$$u_c(P_s) = \text{MAX}[u(P_{s_i})] = \text{MAX}[\sqrt{u^2(D_i) + u^2(D)}] \dots\dots\dots (\text{A.2})$$

式中：
 $u(D_i)$ ——测量重复性引入的标准不确定度；
 $u(D)$ ——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 $u(D_i)$

通过 5 次重复测量检测球，则测量重复性引入的标准不确定度

$$u(D_i) = \frac{s(D_i)}{\sqrt{5}} = 1\mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.3})$$

式中：
 $s(D_i)$ ——多次重复测量球直径的实验标准偏差。

A.5 标准器具引入的标准不确定度 $u(D)$

A.5.1 球尺寸参考值引入的标准不确定度分量

球尺寸参考值的测量不确定为 2.0μm，包含因子 $k_1 = 2$ ，则

$$u_1(D) = \frac{2.0\mu\text{m}}{2} = 1.0\mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.3})$$

A.5.2 球温度变化引入的标准不确定度分量

球的线膨胀系数为 $(8.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，直径为 49.850mm，温度测量误差优于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，按均匀分布处理，包含因子 $k_2 = \sqrt{3}$ ，则

$$u_2(D) = \frac{49.850\text{mm} \times 8.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \approx 0.12 \mu\text{m} \cdots \cdots (\text{A.4})$$

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 $(8.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，半宽区间 $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 内服从均匀分布，测量环境温度按平均偏离标准温度 5°C 估计，包含因子 $k_3 = \sqrt{6}$ ，则：

$$u_3(D) = \frac{49.850\text{mm} \times 5 \text{ } ^\circ\text{C} \times 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{6}} \approx 0.10 \mu\text{m} \cdots \cdots (\text{A.5})$$

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：

$$u(D) = \sqrt{u_1^2(D) + u_2^2(D) + u_3^2(D)} = \sqrt{1.0^2 + 0.12^2 + 0.1^2} \approx 1.0 \mu\text{m} \cdots \cdots (\text{A.6})$$

A.6 合成不确定度

各不确定度互不相关，合成不确定度为：

$$u_c(P_S) = \sqrt{u^2(D_i) + u^2(D)} = \sqrt{1.0^2 + 1.0^2} \approx 1.4 \mu\text{m} \cdots \cdots (\text{A.6})$$

A.7 扩展不确定度

$$U = u_c(P_S)k = 2.8 \mu\text{m}, \quad k = 2 \cdots \cdots (\text{A.7})$$
