



中华人民共和国国家计量校准规范

JJF XXX—20XX

基于视觉跟踪的手持坐标测量系统 校准规范

Calibration Specification for Handheld Coordinate Measuring
Systems based on visual tracking

20XX—XX—XX 发布 20XX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局发布

基于视觉跟踪的手持坐标 测量系统校准规范

JJF XXX—20XX

Calibration Specification for
Handheld Coordinate Measuring Systems
based on visual tracking

本规范经 XXXXXXXXX 于 20XX 年 XX 月 XX 日批准，并自 20XX 年
XX 月 XX 日起施行。

归口单位：全国几何量长度计量技术委员会

主要起草单位：江苏省计量科学研究院

XXX

XXX

XXX

参加起草单位：XXX

XXX

本规范委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目 录

引言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 概述.....	2
5 计量特性.....	3
6 校准条件.....	3
6.1 环境条件.....	3
6.2 测量标准及其他设备.....	4
7 校准项目和校准方法.....	4
7.1 形状探测误差与尺寸探测误差.....	4
7.2 平面形状探测误差.....	7
7.3 单轴坐标重复性误差和单点重复性误差.....	9
7.4 空间长度测量误差.....	11
7.5 跟踪器的动态测长误差及动态测量重复性.....	14
8 校准结果表达.....	15
9 复校时间间隔.....	16
附录 A 校准证书内页格式.....	17
附录 B 空间长度测量误差不确定度评定.....	18
附录 C 尺寸探测误差测量不确定度评定	20

引 言

JJF1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》、JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

基于视觉跟踪的手持坐标测量系统校准规范

1 范围

本规范适用于基于视觉跟踪的手持坐标测量系统（简称跟踪式手持三坐标）的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1071 国家计量校准规范编写规则

JJF 1408 关节臂式坐标测量机校准规范

JJF 1951 基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和定义

3.1 跟踪器 tracker

具有靶点跟踪和解算功能，可提供三维坐标的视觉装置。

3.2 跟踪式光笔 track probe

表面附有靶点的手持接触式测量装置，与跟踪器进行实时交互。

3.3 跟踪式扫描器 track scanner

表面附有靶点的手持扫描测量装置，与跟踪器进行实时交互。

3.4 标准球棒 standard ball bar

通过刚性结构连接的两个或多个直径相同的球构成的标准器。

3.5 标准锥孔 standard conical seat

形状和尺寸经校准的锥形孔座。

3.6 单轴坐标重复性误差 single-axis repeatability error

对同一位置进行多次测量，其测量结果在单轴方向上的最大变动量的一半。

3.7 单点重复性误差 single-point repeatability error

对同一单点位置进行多次测量结果的一致性。

3.8 体素 voxel

一个三维概念（三维空间的像素），将选定测量空间分成若干个连续的空间，每个单元空间即为体素。

3.9 跟踪精度测量空间范围 Tracking accuracy measurement volume

在跟踪器可测量空间范围内的一个具有精度表征的空间区域范围。跟踪器可仅有一个跟踪精度测量空间范围，也可根据精度不同划分为多个跟踪精度测量空间范围。

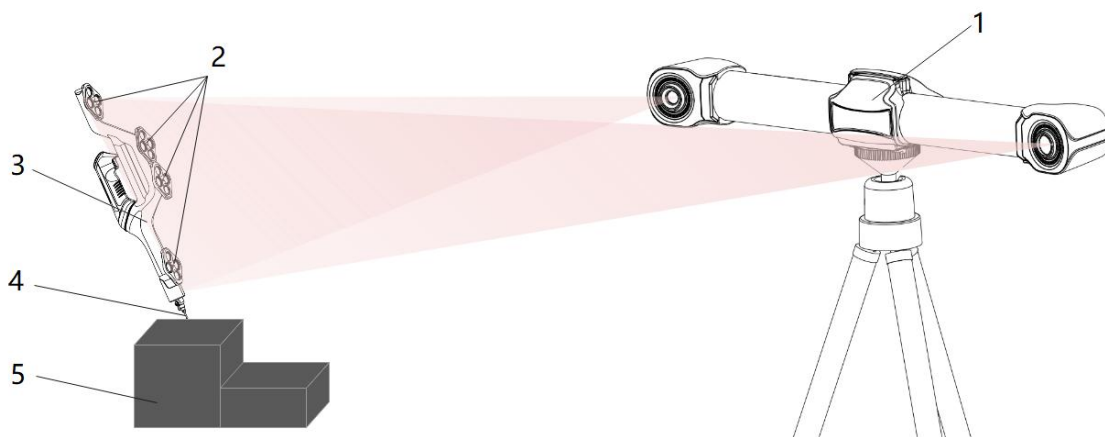
3.10 扫描测量空间范围 scanning measurement volume

跟踪头和跟踪式扫描器相对未发生移动时，跟踪式扫描器所能测量的空间范围。

4 概述

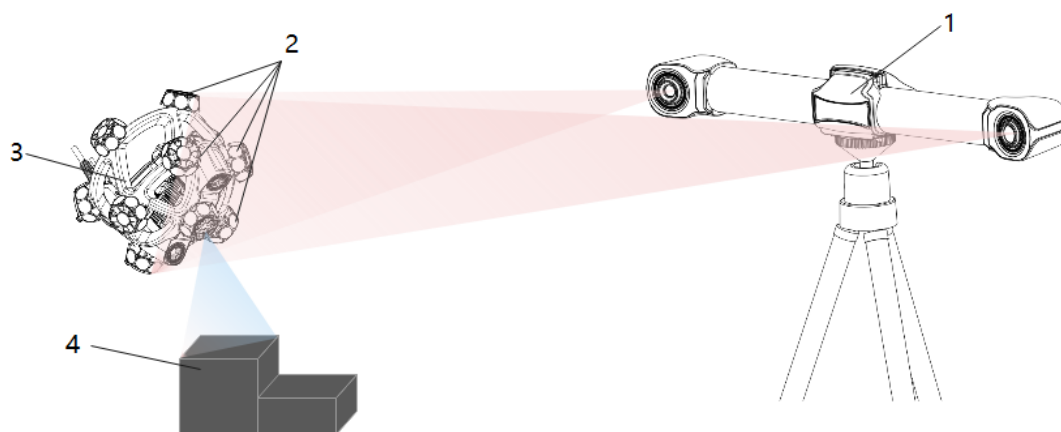
基于视觉跟踪的手持坐标测量系统是一种便携式光学三坐标测量仪器，由视觉跟踪器和附有靶点的手持坐标测量装置（跟踪式光笔或跟踪式扫描器）组成，其系统结构示意图如图 1 所示。

手持坐标测量装置通过测头接触或光学扫描测量零件的被测面，跟踪器中的视觉传感器自动识别手持坐标测量装置上的靶点位置，工作站通过软件进行图像处理计算靶点空间坐标，进而由特定模型算法得到被测零件表面特征的 XYZ 坐标。



1 - 跟踪器；2 - 靶点；3 - 跟踪式光笔；4 - 测头；5 - 被测工件

a) 基于视觉跟踪的手持坐标测量系统（跟踪式光笔）



1 - 跟踪器；2 - 靶点；3 - 跟踪式扫描；4 - 被测工件

b) 基于视觉跟踪的手持坐标测量系统（跟踪式扫描）

图 1 基于视觉跟踪的手持坐标测量系统结构示意图

5 计量特性

5.1 探测误差

5.1.1 形状探测误差 P_{Form} ：测量点到拟合球心距离的最大值与最小值之差。

5.1.2 尺寸探测误差 P_{Size} ：测量点拟合球直径与标准球参考直径之差。

5.1.3 平面形状探测误差 F_{Pla} ：包含测量平面上所有测量数据的两个平行平面之间的最小距离。

5.2 重复性误差

5.2.1 单轴坐标重复性误差 δ_x 、 δ_y 、 δ_z ：空间测量范围内单轴方向坐标测量的一致性。

- 5.2.2 单点重复性误差 P_{Dia} : 空间测量范围内单点位置测量的一致性。
- 5.3 空间长度测量误差 E : 两拟合球心的距离与参考球心距之差或两拟合平面间的法向距离与参考距离之差。
- 5.4 跟踪器的动态测长误差 E_{Dyn} : 跟踪精度测量空间范围内两光学靶点中心的距离与参考距离之差。

6 校准条件

校准应在被校仪器的额定条件下进行。校准前, 需要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。

6.1 环境条件

- 6.1.1 环境温度、湿度应按照生产商的规定或用户规定。
- 6.1.2 温度变化一般不超过 2.0°C/h , 被校仪器与标准器在室内等温时间不小于 4h 。被校仪器开机预热时间应不少于 0.5h 。
- 6.1.3 环境条件, 包括环境的振动、背景光、环境温度及其均匀性和变化率等, 应在不确定度评定中进行考虑。同时, 不应有影响测量的其它环境因素。

6.2 测量标准及其他设备

表1 主要校准用标准器及技术要求

序号	用于校准项目	校准设备	技术要求	跟踪光笔	跟踪扫描
1	形状探测误差 尺寸探测误差	标准球	直径: $10\text{mm} \sim 0.2L$ 圆度: $\leq 3.0\mu\text{m}$	+	+
2	平面形状探测 误差	标准平面	工作面尺寸不小于 $0.5L \times 50\text{mm}$ 平面度: $\leq 3.0\mu\text{m}$	+	+
3	单轴坐标重复 性误差和单点 重复性误差	标准锥孔 或标准球	标准锥孔 直径: $10\text{mm} \sim 15\text{mm}$ 锥角: $60^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 深度: 不小于测头直径的 1/3, 锥孔内表面粗糙度 Ra : $\leq 0.8\mu\text{m}$ 标准球: 直径: $10\text{mm} \sim 0.2L$ 圆度: $\leq 3.0\mu\text{m}$	+	○

4	空间长度测量误差	标准球棒	标准球直径：10mm ~ 0.2L 标准球圆度：≤3.0μm 最短标准球棒长度≥0.3L，最长标准球棒长度≥0.66L； 标准球棒球心距扩展不确定度 $U \leq 1/4 MPE $ （空间长度最大允许误差）	+	+
5	跟踪器的动态测长误差及动态测量重复性	圆周运动标准器或直线运动标准器	靶点中心距长度≥0.3L；	○	○
注： 1.L —— 空间测量范围在测量方向可测量的长度，由制造厂商提供。 2.空间长度示值误差校准可采用满足不确定度和测量范围要求的其它标准器，如量块、步距规、标准锥孔杆、激光干涉仪等。 3.当可测量的长度大于 2 米时，标准平面工作面尺寸可选择 1000mm×50mm。 4.“+”表示适用，“○”表示可选。					

7 校准项目和校准方法

7.1 形状探测误差与尺寸探测误差

测量方法：

根据表 1 选择合适标准球，标准球应固定于精度测量空间范围内 2 个不同位置，默认情况下，一个位置靠近精度测量空间范围的近端边界（靠近跟踪器一端），一个靠近精度测量空间范围的远端边界。如图 1 所示。

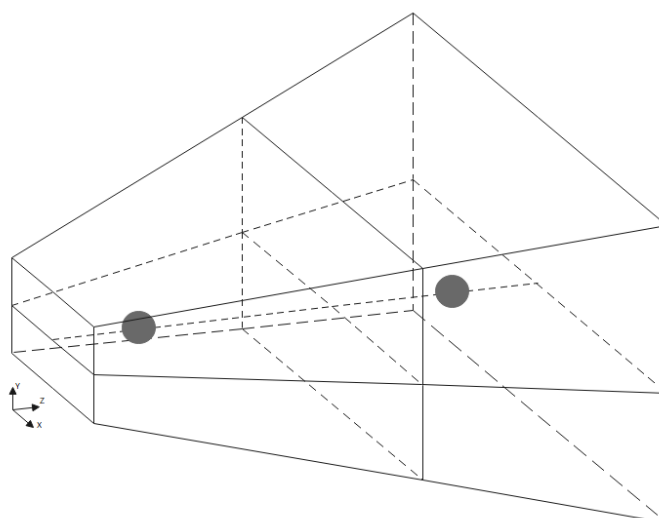


图 1 精度测量空间范围内标准球的推荐位置

7.1.1 跟踪式光笔

每个位置在标准球上测量并记录9个点。这些点应尽量均匀分布在标准球至少半个球上。点的分布位置应由用户规定，如果用户没有规定，建议下列探测分布（见图2）：

- 在标准球的极点（探针方向所定义）一点；
- 极点下 45° 四点（均匀分布）；
- 极点下 90° （即在赤道上）四点（均匀分布），相对于前一组点旋转 45° 。

标准球在每个位置独立重复测量三次取平均值，各位置取绝对值最大者作为最终结果。

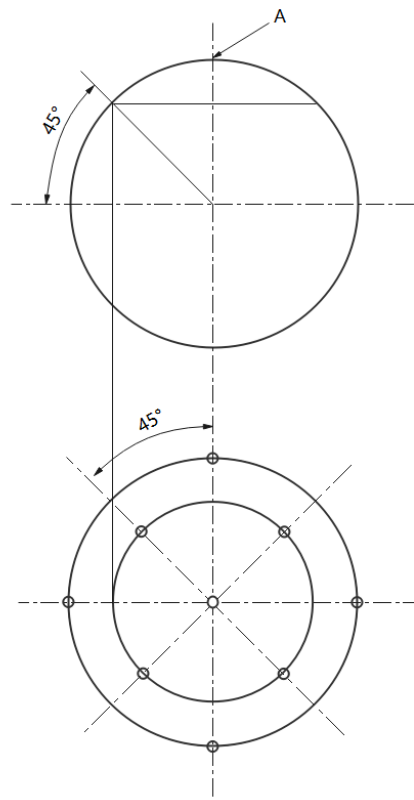


图2 探测误差测量点分布

数据处理：

形状探测误差

每个位置对 9 个测量点分别计算最小二乘半径距离 R ，最大距离 R_{\max} 和最小距离 R_{\min} 之差，即为形状探测误差 P_{Form} （见公式（1））

$$P_{\text{Form}} = R_{\max} - R_{\min} \quad (1)$$

式中：

R_{\max} —— 测量点与拟合球心的最大距离

R_{\min} —— 测量点与拟合球心的最小距离

尺寸探测误差

每个位置使用所有 9 个测量点，采用最小二乘拟合球，分别计算各个位置的拟合球直径 D_{Meas} 与测量球直径参考值 D_{Ref} 的差值即为该位置的尺寸探测误差 P_{Size} （见公式（2））。

$$P_{\text{Size}} = D_{\text{Meas}} - D_{\text{Ref}} \quad (2)$$

式中：

D_{Meas} —— 标准球的直径拟合值

D_{Ref} —— 标准球直径参考值

7.1.2 跟踪式扫描

形状探测误差

分别对每个测量位置的点云计算最小二乘半径距离 R （允许剔除 5% 的数据），最大距离 R_{\max} 和最小距离 R_{\min} 之差，即为形状探测误差 P_{Form} （见公式（1））。

尺寸探测误差

分别对每个测量位置的点云计算（允许剔除 5% 的数据），采用最小二乘拟合球，分别计算各个位置的拟合球直径 D_{Meas} 与测量球直径参考值 D_{Ref} 的差值即为该位置的尺寸探测误差 P_{Size} （见公式（2））。

7.2 平面形状探测误差

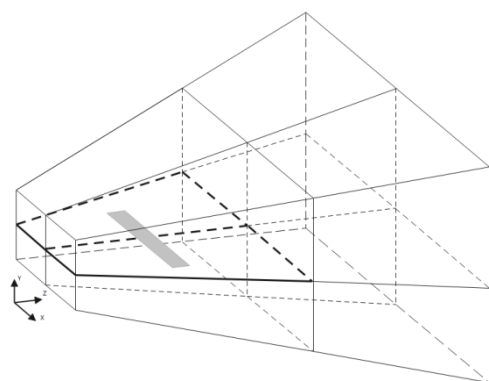
测量方法：

根据表 1 选择合适标准平面，并在精度测量空间范围的至少 5 个不同位置测

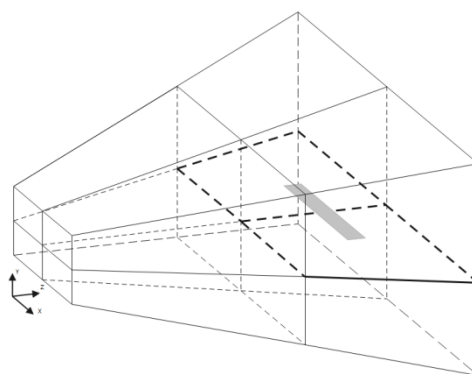
量标准平面，如图 3 所示。标准平面平行于 XZ 平面位于精度测量空间范围的中心平面，长边与 X 轴对齐（位置 1、2）；标准平面平行于 XZ 平面，长边与 Z 轴对齐（位置 3、4）；沿 XYZ 空间对角线，长边与对角线平行（位置 5）。

7.2.1 跟踪式光笔

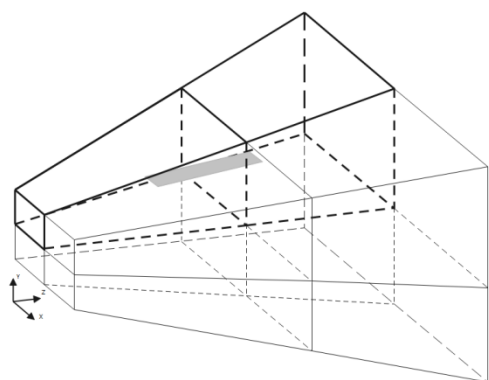
标准平面每个位置测量一次，每个位置的测量点要求最少 16 个点，且测量点应采用矩形栅格方案近似均匀的分布在标准平面上。



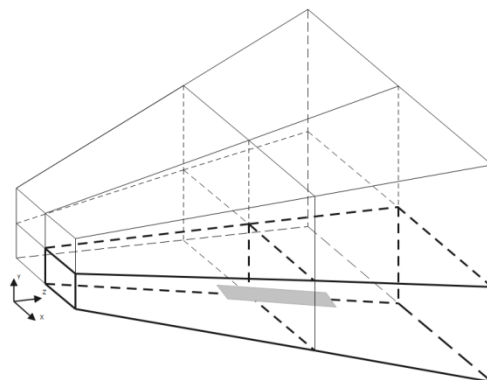
位置 1



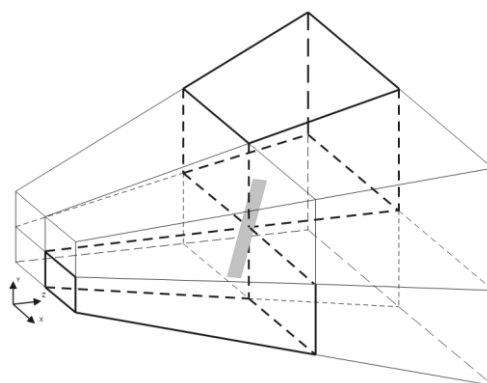
位置 2



位置 3



位置 4



位置 5

图 3 精度测量空间范围内标准平面的推荐位置

数据处理:

确定包含所有测量点的两个平行平面的最短距离, 作为该位置平面形状探测误差 $F_{\text{Pla},i}$, i 表示测量位置的序号。

取各位置中最大值, 作为平面形状探测误差 F 的测量结果:

$$F_{\text{Pla}} = \max (F_{\text{Pla},i})$$

式中: i 表示位置的序号, $i = 1, 2, \dots, 5$ 。

7.2.2 跟踪式扫描

确定包含所有测量点 95% 的两个平行平面的最短距离, 作为该位置平面形状探测误差 $F_{\text{Pla},i}$, i 表示测量位置的序号。

取各位置中最大值, 作为平面形状探测误差 F 的测量结果。

7.3 单轴坐标重复性误差和单点重复性误差

测量方法:

7.3.1 跟踪式光笔

一、标准锥孔法:

根据表 1 选择合适标准锥孔, 在跟踪式手持坐标测量系统精度测量空间范围内的 2 个不同位置 (近端和远端) 固定安装标准锥孔。保持光笔测头对准标准锥孔中心, 以测头为轴心, 光笔沿从左到右旋转均匀取 5 个点, 沿前到后旋转再均匀取 5 个点 (如图 4 所示), 得到 10 个锥心坐标 (x_i, y_i, z_i) 。

制造商可规定光笔旋转角度限制, 但左右不应小于 $\pm 45^\circ$, 前后不应小于 $\pm 30^\circ$ 。

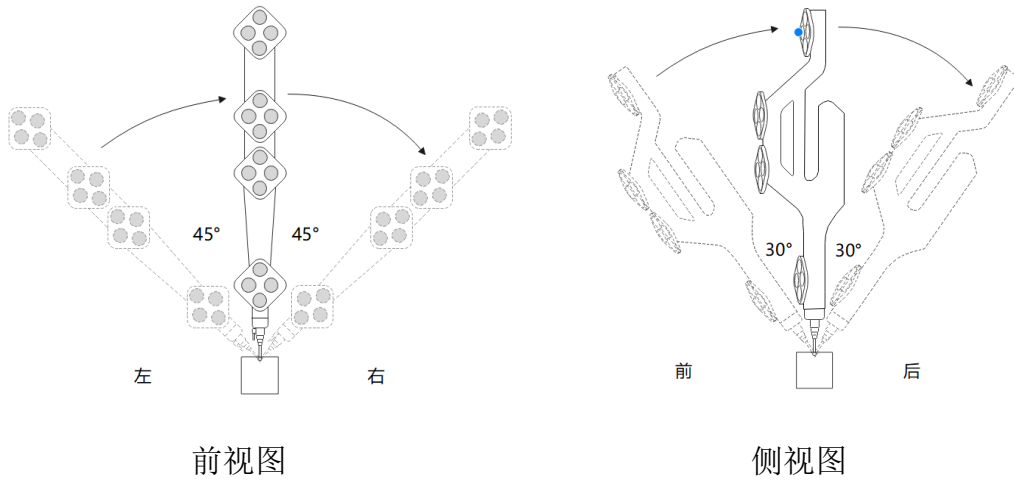


图 4 位置重复性测量示意图

二、标准测球法：

在跟踪式手持坐标测量系统精度测量空间范围内的 2 个不同位置（近端和远端）固定安装标准球。光笔沿从左到右旋转均匀取 5 个位姿，沿前到后旋转再均匀取 5 个位姿，每个位姿在检测球上分别测量五个点：一点位于顶端极点，其余四个均匀分布在检测球中心赤道，如图所示。重复测量 10 次，得到 10 个球心坐标 (x_i, y_i, z_i) 。

数据处理

得到的 10 个坐标中单轴坐标的最大值与最小值之差的二分之一分别为 δ_x 、 δ_y 、 δ_z （见公式（1）~公式（3）），即各单轴坐标重复性误差。

$$\delta_x = \frac{\max(x_i) - \min(x_i)}{2} \quad (3)$$

$$\delta_y = \frac{\max(y_i) - \min(y_i)}{2} \quad (4)$$

$$\delta_z = \frac{\max(z_i) - \min(z_i)}{2} \quad (5)$$

式中：

x_i 、 y_i 、 z_i —— 分别表示 10 个单轴测量点坐标

单点重复性误差

单点重复性误差 P_{Dia} ，将 10 个锥心（或球心）坐标，拟合最小外接球，这个球的直径标记为 P_{Dia} （见公式（6）~公式（7）），该计量特性用于考察单点

坐标的重复性能力。公式如下：

$$\delta_i = \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 + (z_i - z_a)^2} \quad (6)$$

$$P_{\text{Dia}} = 2\sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{10-1}} \quad (7)$$

式中：

x_a 、 y_a 、 z_a —— 分别表示 10 个单轴测量点坐标的平均值

7.3.2 跟踪式扫描

单点重复性误差

在跟踪精度测量空间范围内的 2 个不同位置（近端和远端）固定安装标准球。跟踪扫描器水平依次旋转均匀取 8 个位姿方向，每个方向对应一片靶点区域，每个位姿的靶点区域分别朝向跟踪器进行扫描，且在扫描标准球时需确保跟踪器跟踪的是同一片靶点区域，如图 5 所示。依次测量 8 次，得到 8 个球心坐标 (x_i, y_i, z_i) 。

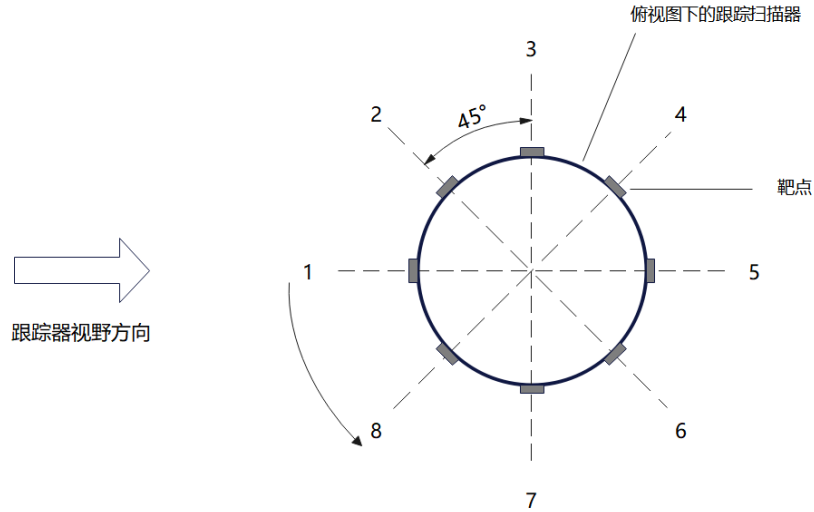


图 5 跟踪扫描器相对跟踪器姿态示意图

单点重复性误差 P_{Dia} ，将 8 个球心坐标，拟合最小外接球，这个球的直径标记为 P_{Dia} （见公式（6）~公式（7）），该计量特性用于考察跟踪式扫描单点坐标的重复性能力。

7.4 空间长度测量误差

测量方法：

根据表 1 选用至少两个不同长度的标准球棒（或其他标准器），最长标准球棒长度应不小于测量范围的 66%。

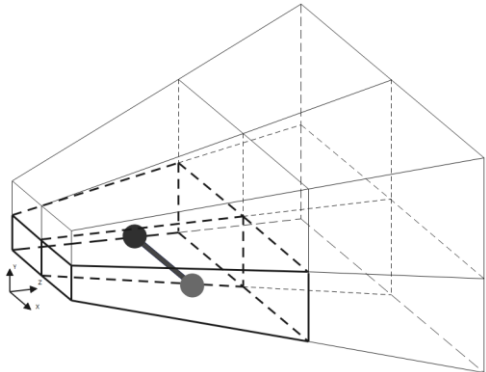
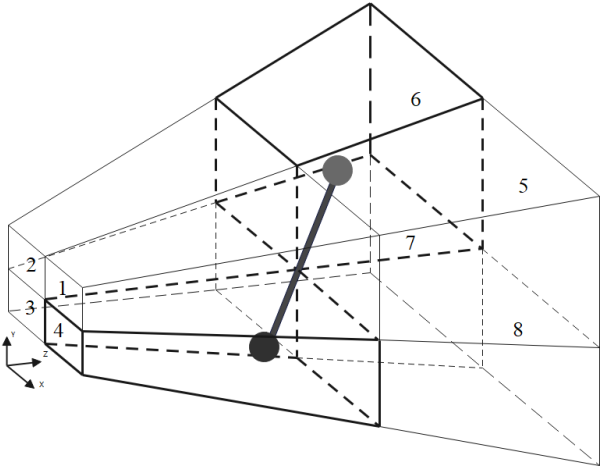
将精度测量空间范围分为 8 个体素，标准球棒的两个球体分别完整处于不同体素中，标准球棒有 28 个可选位置（8 个体素中的任选 2 个的组合），推荐的摆放空间位置见图 5 所示，标准球棒的摆放空间姿态为水平、垂直和 45° 倾斜。

7.4.1 跟踪式光笔

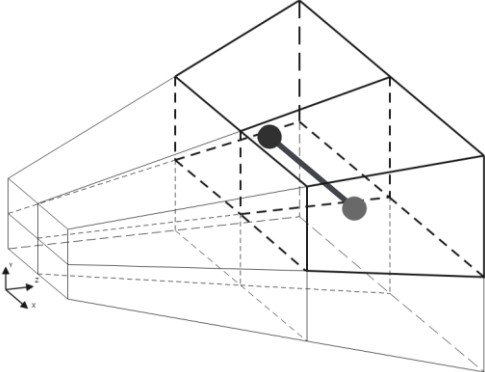
测量标准球上不少于 5 个点（4 个点分布在赤道线上，1 个点位于球的一极），拟合球心，计算标准球棒的中心长度。

标准球棒在每一位置独立重复测量 3 次。

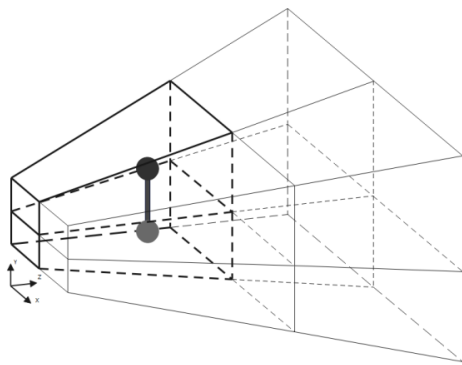
位置	体素	体素
1	3	4
2	6	5
3	2	3
4	5	8
5	2	6
6	4	8
7	6, 7	1, 4
8	2, 3	5, 8
9	4	6
10	3	5



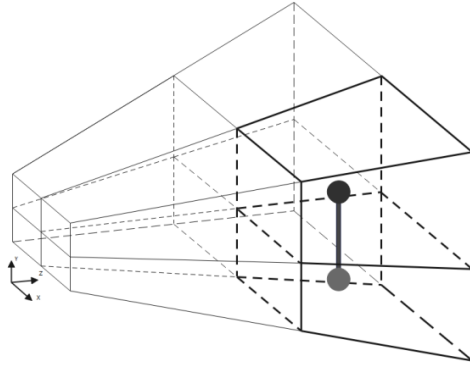
位置 1



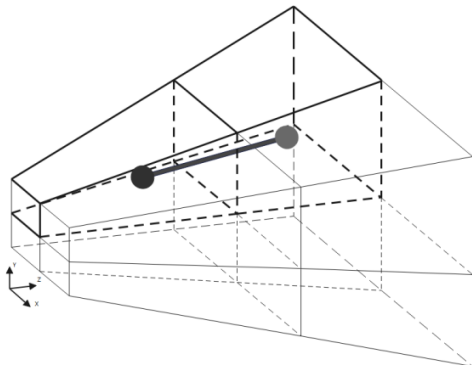
位置 2



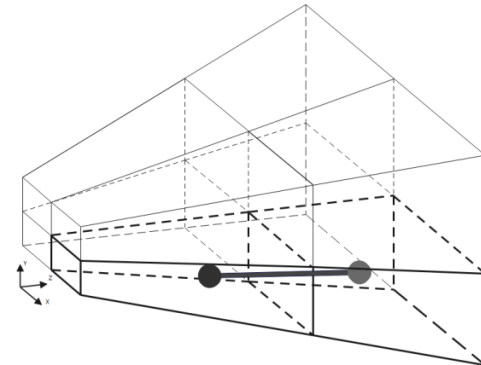
位置 3



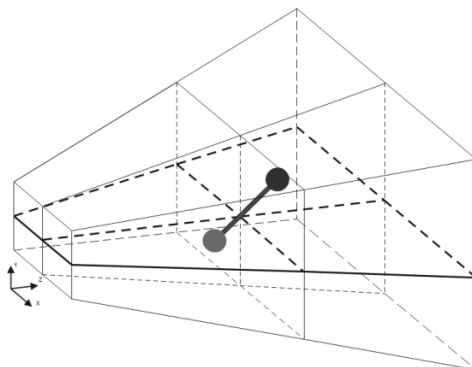
位置 4



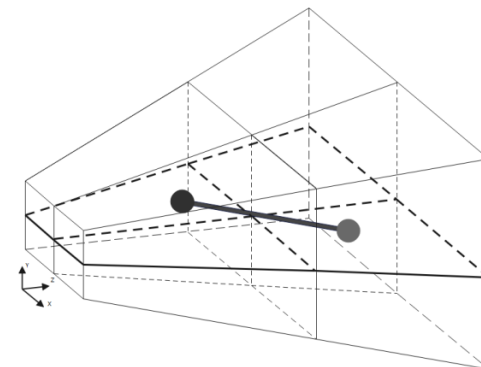
位置 5



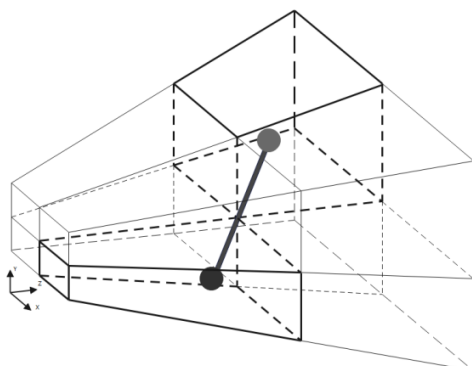
位置 6



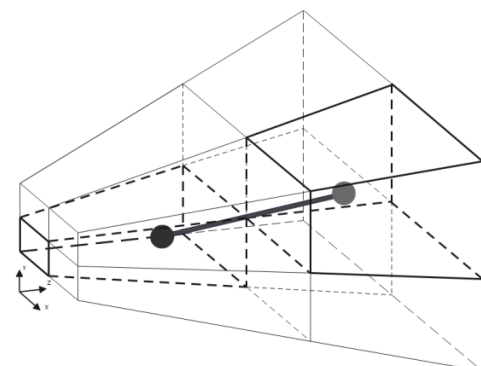
位置 7



位置 8



位置 9



位置 10

图 5 精度测量空间范围内标准球棒的推荐位置

数据处理：

对于所有测量位置，用最小二乘拟合法，拟合所有球心位置。计算标准球棒在每个位置的球心距，空间长度示值误差 E_i 是标准球棒中心长度测量值 L_i 与其参考值 L_{Ref} 之差，计算公式如下：

$$E_i = L_i - L_{\text{Ref}} \quad (8)$$

式中

L_{Ref} —— 标准球棒中心长度的参考值；

L_i —— 每个位置标准球棒中心长度的测量值；

i 表示位置的序号， $i = 1, 2, \dots, 10$ 。

取各位置 E_i 绝对值最大者作为校准结果。

使用量块作为标准器时，在每个端面上测量不少于 5 个点（4 个点在四角，1 个点位于中心），拟合计算量块端面中心长度，重复测量 3 次。

使用标准锥孔杆作为标准器时，保持光笔测头对准标准锥孔中心，以测头为轴心，光笔在前、后、左、右和中心取 5 个点（如图 4 所示），拟合中心，计算标准锥孔杆的中心长度，重复测量 3 次。

7.4.2 跟踪式扫描

分别对所有测量位置的点云进行计算（允许剔除 5% 的数据），用最小二乘拟合法，拟合所有球心位置。计算标准球棒在每个位置的球心距，空间长度示值误差 E_i 是标准球棒中心长度测量值 L_i 与其参考值 L_{Ref} 之差，计算公式见公式（8），取各位置 E_i 绝对值最大者作为校准结果。

7.5 跟踪器的动态测长误差及动态测量重复性

测量方法：

根据表 1 选用圆周运动标准器或直线运动标准器，布置圆周运动标准器或直线运动标准器在跟踪精度测量空间范围中心附近。设定其工作速度为 v ，在标准器达到规定的速度并稳定后，连续获取标准器上固定靶点的图像，计算获得靶点的空间坐标，并计算两靶点在动态测量的中心距离 L_{Dyn} 与参考距离

L_{Ref} 的差值 E_{Dyn} ，作为速度 v 条件下跟踪器的动态测长误差。计算公式如下：

$$E_{\text{Dyn}} = L_{\text{Dyn}} - L_{\text{Ref}} \quad (8)$$

式中

L_{Ref} —— 两固定靶点间中心距离的参考值，mm；

L_{Dyn} —— 跟踪器动态测量的两固定靶点间的中心距离，mm；

测量时，速度 v 由厂家或用户给出。重复测量 10 次，计算平均值作为速度 v 条件下的动态测长误差，同时计算标准偏差 σ ，作为动态测量重复性。报告测量结果时，应给出线速度 v 、动态测长误差、动态测量重复性、最大值。有条件时，应检测不同速度条件下的动态测长误差和动态测量重复性。

8 校准结果表达

经校准的跟踪式手持坐标测量系统出具校准证书，并给出各校准项目名称和测量结果以及空间长度示值误差的扩展不确定度。

校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点(如果实验室的地址不同)；
- d) 证书的唯一性标识(如编号)，每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；

- o)校准结果仅对被校对象有效的声明；
 - p)未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。
- 校准证书内页格式参见附录A。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由被校跟踪式手持坐标测量系统的使用情况、使用者、本身质量等诸多因素决定，因此，送校单位可根据实际情况自主决定复校时间间隔。建议复校时间间隔不超过 1 年。

附录 A

校准证书内页格式

本跟踪式手持坐标测量系统经校准，结果如下：

1. 形状探测误差 P_{Form} ： _____ mm
2. 尺寸探测误差 P_{Size} ： _____ mm
3. 平面形状探测误差 F_{Pla} ： _____ mm
4. 单轴坐标重复性误差 δ_x ： _____ mm
 δ_y ： _____ mm
 δ_z ： _____ mm
5. 单点重复性误差 P_{Dia} ： _____ mm
6. 空间长度测量误差 E ： _____ mm， U = _____ mm ($k=2$)
7. 动态测长误差 E_{Dyn} ： _____ mm， 动态测量重复性 σ ： _____ mm

注：校准证书的内容符合 JJF1071《国家计量校准规范编写规则》的要求。由于各实验室对校准证书有自己的设计，本附录仅建议与校准结果相关部分的内页格式。其中的部分内容可以由于实验室的证书格式不同而在其他部分表述。

附录 B

空间长度测量误差不确定度评定

B.1 测量方法

依据本校准规范，在温度 20℃、相对湿度 53%环境下，将长度为 1500mm 的标准球棒分别放置在精度测量空间范围的不同位置处进行测量，以跟踪式手持三坐标为例评定空间长度测量误差校准结果的不确定度。

B.2 测量模型

由测量原理和方法，得到测量模型：

$$E_i = L_i - L_{Ref} \quad (B.1)$$

式中

L_{Ref} —— 标准球棒中心长度的参考值；

L_i —— 每个位置标准球棒中心长度的测量值；

B.3 方差和灵敏系数

因为各输入量独立。按不确定度传播频率：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2$$

由式 (B.1) 得方差：

$$u_c^2(E_i) = c_1^2 u^2(L_i) + c_2^2 u^2(L_{Ref})$$

式中：

$u(L_i)$ —— 测量重复性引入的标准不确定度分量；

$u(L_{Ref})$ —— 标准器具引入的标准不确定度分量。

灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(E_i)}{\partial(L_i)} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial(E_i)}{\partial(L_{Ref})} = -1$$

故：

$$u_c^2(E_i) = u^2(L_i) + u^2(L_{Ref})$$

B.4 标准不确定度分量

B.4.1 标准球棒测量不确定度引入的标准不确定度分量

标准球棒测量不确定度 $U=5.0\mu\text{m}$ ，包含因子 $k=2$ ，则

$$u_1(L_{Ref}) = \frac{5.0\mu\text{m}}{2} = 2.5\mu\text{m}$$

B.4.2 标准球棒温度变化引入的标准不确定度分量

标准球棒的线膨胀系数为 $(1.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，长度为 1500mm，温度测量不确定度优于 0.1°C ，按均匀分布处理，则

$$u_2(L_{Ref}) = \frac{L\alpha\Delta t}{\sqrt{3}} = \frac{1500 \times 10^3 \times 1.5 \times 10^{-6} \times 0.1}{\sqrt{3}} = 0.13\mu\text{m}$$

B.4.3 标准球棒的线膨胀系数误差引入的标准不确定度分量

标准球棒的线膨胀系数一般为 $(1.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，在半宽区间内变化量为 $\Delta\alpha = 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，推荐实验室环境温度 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ ，温度平均值偏离不超过 1.5°C ，按均匀分布处理，则

$$u_3(L_{Ref}) = \frac{L(t-20)\Delta\alpha}{\sqrt{3}} = \frac{1500 \times 10^3 \times 1.5 \times 1 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \mu\text{m} \approx 1.3\mu\text{m}$$

则

$$\begin{aligned} u(L_{Ref}) &= \sqrt{u_1^2(L_{Ref}) + u_2^2(L_{Ref}) + u_3^2(L_{Ref})} \\ &= \sqrt{2.50^2 + 0.13^2 + 1.30^2} \\ &= 2.8 \mu\text{m} \end{aligned}$$

B4.4 测量重复性引入的标准不确定度分量

用跟踪式光笔三维坐标测量系统对 1500.329mm 长度进行 10 次的测量，测得数据如下：

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 /mm	1500.3 36	1500.3 48	1500.3 41	1500.3 44	1500.3 27	1500.3 37	1500.3 42	1500.3 38	1500.3 50	1500.3 46
示值误差 /mm	0.007	0.019	0.012	0.015	-0.002	0.008	0.013	0.009	0.021	0.017

根据贝塞尔公式计算实验标准偏差

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 6.75 \mu\text{m}$$

用标准球棒 ($L = 1500\text{mm}$) 在空间不同位置、不同姿态进行重复测量，其重复性引入不确定度为：

$$u(L_i) = 6.75 \mu\text{m}$$

B.5 不确定度分量一览表

表 B.1 标准不确定度一览表

标准不确定 度分量 u_i	不确定度来源	u_i	c_i	$ c_i u(i) / \mu\text{m}$
--------------------	--------	-------	-------	---------------------------

$u_1(L_{Ref})$	标准球棒测量不确定度	2.5	-1	2.5
$u_2(L_{Ref})$	标准球棒温度变化测量误差	0.13	-1	0.13
$u_3(L_{Ref})$	标准球棒温度线膨胀系数测量误差	1.3	-1	1.30
$u(L_i)$	测量重复性引入的标准不确定度分量	$6.75 \mu m$	1	6.75

B.6 合成不确定度

$$u_c(L) = \sqrt{u^2(L_{Ref}) + u^2(L_i)} = \sqrt{2.82^2 + 6.75^2} \mu m = 7.31 \mu m$$

B.7 扩展不确定度

$$U = 15 \mu m (k = 2)$$

跟踪式光笔坐标测量系统空间长度测量误差在测量范围内的最大允许误差为 $\pm 0.067mm$ 。此时的测量能力指数：

$$C_m = \frac{|MPE|}{U} = 4.5$$

附录 C

尺寸探测误差测量不确定度评定

C.1 概述

依据本校准规范，在温度 20℃，相对湿度 51%环境下，用跟踪式光笔三维坐标测量系统直接测量标准球，将测得值与标准球直径的参考值相减，其差值即为跟踪式光笔三维坐标测量系统尺寸探测误差。现以尺寸 38.094mm 标准球作为标准器进行测量不确定度评定。

C.2 测量模型

$$P_{\text{size}} = D_x - D_s$$

式中： P_{size} — 尺寸探测误差；

D_x —跟踪式光笔三维坐标测量系统测量标准球的测得值；

D_s —标准球直径参考值；

C.3 方差和灵敏系数

$$u_c^2(P_{\text{size}}) = c_1^2 u^2(D_x) + c_2^2 u^2(D_s)$$

式中：灵敏系数 $c_1 = \frac{\partial P_{\text{size}}}{\partial D_x} = 1$ ， $c_2 = \frac{\partial P_{\text{size}}}{\partial D_s} = -1$

C.4 测量不确定度来源分析与标准不确定度分量的评定

不确定度来源主要为测量重复性、标准器标准球不准引入的标准不确定度以及环境条件的影响等

C.4.1 标准器温度变化引入的标准不确定度分量 u_1 ：

钢材质标准球的膨胀系数为 $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，尺寸为 38.094mm，考虑温度测量误差优于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，按均匀分布处理，则

$$u_1(D_s) = \frac{38.094\text{mm} \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.1^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \approx 0.00003\text{mm}$$

C.4.2 标准器的膨胀系数测量误差引入的标准不确定度分量 u_2 ：

钢材质标准球的膨胀系数在 $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，在半宽区间 $1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 内服从三角分布，实验室环境温度按平均偏离 1°C ，则：

$$u_2(D_S) = \frac{38.094\text{mm} \times 1^{\circ}\text{C} \times 1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}}{\sqrt{6}} \approx 0.00002\text{mm}$$

C. 4.3 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_3 ：

用跟踪式光笔三维坐标测量系统对 38.094mm 长度进行重复 6 次的测量，测得数据如下：

测量次数	1	2	3	4	5	6
测量值/mm	38.079	38.077	38.081	38.074	38.077	38.076
示值误差/mm	-0.015	-0.017	-0.013	-0.020	-0.017	-0.016

根据贝塞尔公式计算实验标准偏差

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2} = 0.0023\text{mm}$$

实际重复测量 3 次，故

$$u_3 = \frac{s(x)}{\sqrt{3}} = 0.0013\text{mm}$$

C. 4.4 标准球直径参考值的误差引入的标准不确定度分量 u_4 ：

查标准球的校准证书，可知在 38.094mm 测量点的 $U=0.003\text{mm}(k=2)$ ，则：

$$u_4 = \frac{U}{2} = 0.0015\text{mm}$$

C. 5 合成标准不确定度的评定

通过以上分析得知，不确定度分量有 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 ，且互不相关，其合成不确定度 u_c 用如下公式：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 0.0020\text{mm}$$

C. 6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 0.0020 \times 2 = 0.004\text{mm}$$