

JJF(闽)1149—2024

JJF

福建省地方计量技术规范

JJF(闽)1149—2024

全景成像测量摄像机校准规范

Calibration Specification for Panoramic Imaging
Measurement Cameras

2024-05-30 发布

2024-08-30 实施

福建省市场监督管理局 发布

全景成像测量摄像机校准规范

Calibration Specification for Panoramic
Imaging Measurement Cameras

JJF (闽) 1149—2024

归口单位：福建省市场监督管理局
主要起草单位：福建省计量科学研究院
参加起草单位：福建汇川物联网技术科技股份有限公司

本规范委托福建省计量规范技术委员会负责解释

本规范主要起草人:

刘震 (福建省计量科学研究院)

何超鹏 (福建省计量科学研究院)

赖征创 (福建省计量科学研究院)

参加起草人:

林文 (福建汇川物联网技术科技股份有限公司)

张翔 (福建汇川物联网技术科技股份有限公司)

福建省计量规范技术委员会

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 概述	(1)
3 计量特性	(1)
3.1 测距误差	(1)
3.2 空间坐标测量误差	(1)
3.3 图像测量误差	(1)
3.4 位移误差	(1)
4 校准条件	(2)
4.1 环境条件	(2)
4.2 测量标准及其他设备	(2)
5 校准项目和校准方法	(2)
5.1 测距误差	(2)
5.2 空间坐标测量误差	(3)
5.3 图像测量误差	(6)
5.4 位移误差	(6)
6 校准结果表达	(6)
7 复校时间间隔	(7)
附录 A 典型仪器技术参数	(8)
附录 B 标靶	(9)
附录 C 三轴直线位移装置(示例)	(10)
附录 D 校准记录格式(式样)	(11)
附录 E 校准证书内容及内页格式	(13)
附录 F 测量结果不确定度评定(示例)	(14)

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本校准规范的基础性系列技术文件。

本规范为首次制定。

福建省计量规范技术委员会

全景成像测量摄像机校准规范

1 范围

本规范适用于具备测距和图像测量功能的全景成像测量摄像机（以下简称测量摄像机）的校准。

2 概述

测量摄像机是一种能测量物体的距离、尺寸、位移等参数的测量仪器，该仪器支持采集全景图像及全景视图的局部细节还原，并通过互联网数据传输实现远程视频测量。该仪器主要应用于建设工程安全质量监管、地质灾害监测等。

测量摄像机一般由主机、控制器及平台软件组成。其中主机包含测距模块、摄像模块、双轴云台和底座（如图1所示），它通过测距与双轴云台的测角系统建立起坐标系，该坐标系与摄像模块的视频图像融合，赋予了视频图像空间坐标测量能力。控制器与主机相连，并通过互联网与平台软件进行数据传输，实现远程视频测量。

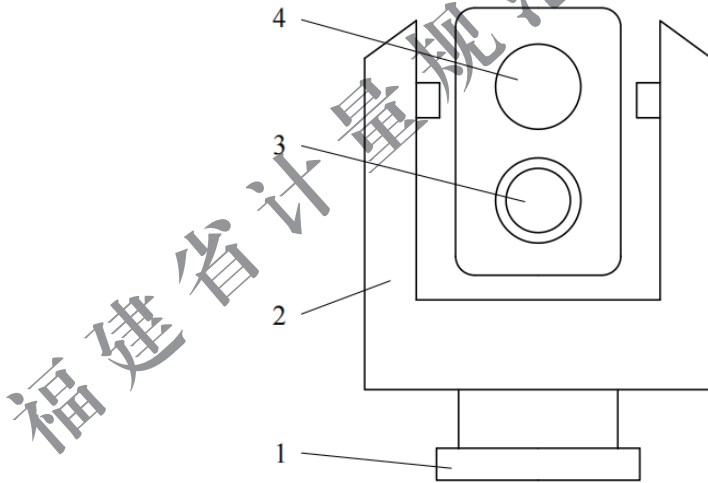


图1 测量摄像机主机结构示意图

1—底座；2—双轴云台；3—摄像模块；4—测距模块

3 计量特性

3.1 测距误差

3.2 空间坐标测量误差

3.3 图像测量误差

3.4 位移误差

注：上述计量特性的最大允许误差由生产商或用户规定，当制造商及用户均无明确规定时，附录A中典型仪器的技术参数可供参考。

4 校准条件

4.1 环境条件

实验室内的校准工作在常温下进行。实验室外的校准应选择气象条件稳定、大气能见度好的天气条件下进行，仪器不受障碍物、人员车辆穿行等干扰。

4.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备见表 1。允许采用满足测量不确定度要求的其他标准器进行校准。

表 1 测量标准及其他设备

序号	校准项目	校准设备	技术要求
1	测距误差	标准基线	$U=0.3\text{mm}+2\times 10^{-6}D$, $k=2$
2	空间坐标测量误差	标准尺	尺长 $\geq 2\text{m}$, 分度值 10mm , 刻线宽度 $\geq 5\text{mm}$, 刻线间距示值误差 MPE: $\pm 0.6\text{mm}$
		方块标靶	见附录 B.1
		标准基线	$U=0.3\text{mm}+2\times 10^{-6}D$, $k=2$
3	图像测量误差	标准尺	尺长 $\geq 2\text{m}$, 分度值 10mm , 刻线宽度 $\geq 5\text{mm}$, 刻线间距示值误差 MPE: $\pm 0.6\text{mm}$
4	位移误差	棋盘标靶	见附录 B.2
		三轴直线位移装置	见附录 C

注 1: 标准基线测量范围不小于 (0 ~ 50) m, 可以是室内长导轨基线或室外测桩基线。
注 2: D —基线长度。

5 校准项目和校准方法

5.1 测距误差

将测量摄像机安置在标准基线的零点附近, 其中心应尽可能的在标准基线的轴线上。在距测量摄像机约 5m 处设置起始测点, 并在 (5 ~ 50) m 范围内大致均匀分布 5 个测点, 每一测点校准时, 需在测点座上安装反射棱镜, 反射棱镜需严格对中, 高度与测量摄像机大致等高, 如图 2 所示。

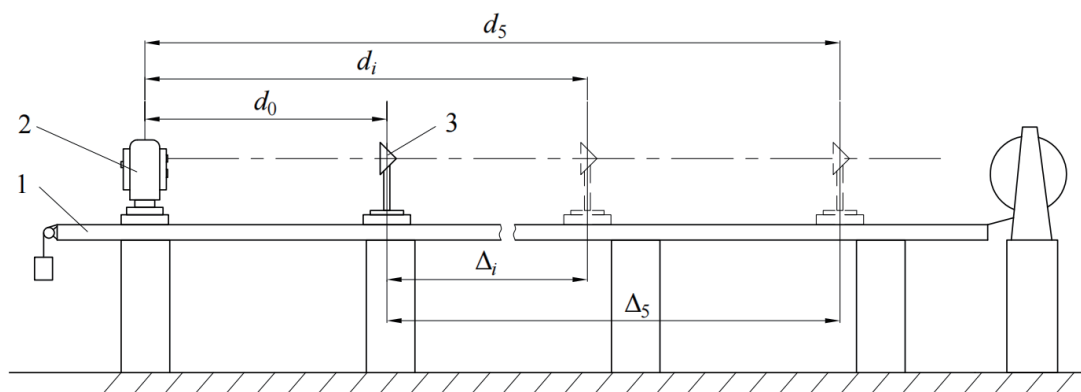


图2 测距误差校准示意图

1—长导轨基线；2—测量摄像机；3—棱镜

校准时，用测量摄像机视频画面的十字丝照准反射棱镜中心，首先测出起始测点距测量摄像机的距离值 d_0 ，再依次测量出其它测点距测量摄像机的距离值 d_i ，各测点重复测量 3 次取平均值按公式 (1) 计算测距误差。当用户有要求对 50m 以上的测距误差进行校准时，可在 50m 以上适当增加 1 ~ 2 个校准点。

$$e_i = \Delta_i - D_i \quad (1)$$

其中：

$$\Delta_i = \overline{d_i} - \overline{d_0}$$

式中：

e_i ——第 i 测点测距误差，m；

Δ_i ——第 i 测点至起始测点的距离，m；

$\overline{d_i}$ ——第 i 测点测距平均值，m；

$\overline{d_0}$ ——起始测点测距平均值，m；

D_i ——第 i 测点至起始测点的基线标准值，m。

5.2 空间坐标测量误差

空间坐标测量误差分别以标准尺和标准基线作为标准器进行校准。

5.2.1 标准尺测量的空间坐标测量误差

在距测量摄像机距离为 D_c 的立面上放置标准尺，标准尺的刻线面应朝向测量摄像机，标准尺的放置有水平、竖直、左斜、右斜 4 种方式，如图 3 所示。

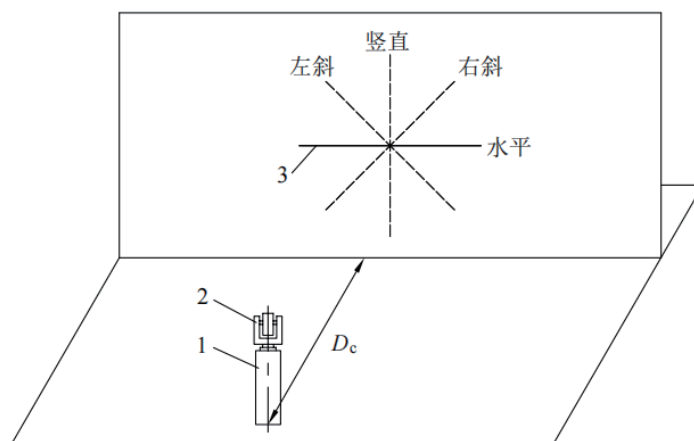


图3 标准尺测量示意图

1—支架；2—测量摄像机；3—标准尺

校准时，将摄像机的光学倍率调整为最大，按表2要求的校准步骤进行，其中正镜为测量摄像机在常规状态下的测量；倒镜是相对正镜而言，是将正镜时测量的水平角和垂直角均旋转 180° ；立轴旋转 90° 表示将测量摄像机整体（含底座）绕立轴水平旋转 90° 。

表2 标准尺测量校准步骤

距离 D_c (近似值)	标准尺放置	校准过程	测量组数
5m	水平	正镜→倒镜→立轴旋转 90° →正镜→倒镜	4组
	竖直	正镜→倒镜	2组
	左斜（或右斜）	正镜→倒镜	2组
30m	水平	正镜	1组
	竖直	正镜	1组
	左斜	正镜	1组
	右斜	正镜	1组

以距测量摄像机约5m处水平放置标准尺为例说明：在标准尺量程内选取 n ($n \geq 4$)个测量段，其中最小测量段长度值应在(20~50)mm范围内，最大测量段应尽量覆盖标准尺的量程。先正镜测量，在视频实时测量模式下采用空间点对点测出这些测量段长度值，每段长度重复测量3次取平均值，按公式(2)计算空间坐标测量误差，得到第1组测量结果($\delta_{11}, \delta_{12}, \dots, \delta_{1n}$)，然后将测量摄像机倒镜，对此 n 段距离再进行测量，得到第2组测量结果($\delta_{21}, \delta_{22}, \dots, \delta_{2n}$)。将测量摄像机整体绕立轴旋转 90° ，重复上述正镜测量和倒镜测量，得到($\delta_{31}, \delta_{32}, \dots, \delta_{3n}$)和($\delta_{41},$

$\delta_{42}, \dots, \delta_{4n}$) 共完成 4 组测量。每一测量段 A_j ($j=1, 2, \dots, n$) 取 4 组中最大示值误差即 $\max(\delta_{1j}, \delta_{2j}, \delta_{3j}, \delta_{4j})$ 为该段空间坐标测量误差校准结果。

$$\delta_{ij} = \overline{L_{ij}} - A_j \quad (2)$$

式中:

δ_{ij} ——第 i 组第 j 段空间坐标测量误差, mm;

$\overline{L_{ij}}$ ——第 i 组第 j 段长度测量平均值, mm;

A_j ——第 j 段长度标准值, mm。

5.2.2 标准基线测量的空间坐标测量误差

将两个方块标靶分别安置在标准基线的两端, 标准基线的长度 A 在 (20m ~ 50m) 范围内, 在标准基线的一侧距离为 D_c (5m ~ 30m) 的位置处架设测量摄像机, 测量摄像机应分别架设在 3 处不同位置, 如图 4 所示。

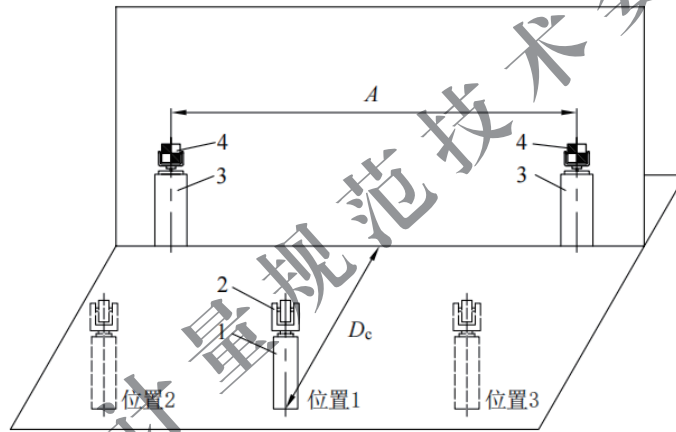


图 4 标准基线测量示意图

1—支架; 2—测量摄像机; 3—测点座(桩); 4—方块标靶

校准时, 将摄像机的光学倍率调整为最大, 同时使测量摄像机的视频单个画面内无法同时看到两方块标靶。调整两方块标靶的方位使其均朝向测量摄像机, 在视频实时测量模式下先用十字丝对准测量其中一个方块标靶的中心坐标, 然后转动测量摄像机在另一个视频画面中对准测量另一方块标靶中心坐标, 采用空间点对点算出两方块标靶的中心距, 重复测量 3 次取平均值, 按公式 (3) 计算每个位置处的空间坐标测量误差。取 3 处测量最大示值误差为校准结果。

$$\delta_k = \overline{L_k} - A_k \quad (3)$$

式中:

δ_k ——空间坐标测量误差, m;

$\overline{L_k}$ ——两方块标靶中心距离测量平均值, m;

A_k ——两方块标靶中心距离标准值, m。

5.3 图像测量误差

在距测量摄像机约 30m 处放置标准尺，标准尺的刻度面应朝向测量摄像机，标准尺应在水平、竖直和斜向三个位置分别放置，如图 5 所示。

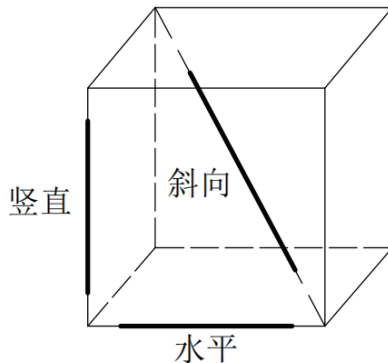


图 5 图像测量标准尺放置示意图

校准时，将摄像机的光学倍率调整为最大，并调整测量摄像机使标准尺刻度在视频单个画面内尽可能全部可见。选择图像测量模式，截取当前图像，在截取的标准尺图像的量程内选取 n ($n \geq 4$) 个测量段，其中最小测量段长度值应在 (20 ~ 50) mm 范围内，最大测量段应尽量覆盖标准尺的量程。然后在该图像上测量出这些测量段的长度值，每段重复测量 3 次取平均值，按公式 (4) 计算图像测量误差。

$$\varepsilon_i = \bar{P}_i - A_i \quad (4)$$

式中：

ε_i ——第 i 段图像测量误差，mm；

\bar{P}_i ——第 i 段图像测量平均值，mm；

A_i ——第 i 段长度标准值，mm。

5.4 位移误差

在距测量摄像机约 30m 处放置三轴直线位移装置，调整三轴直线位移装置使其前后位移轴与测量摄像机的摄影主光轴大致平行。将棋盘标靶固定在三轴直线位移装置上，棋盘标靶的靶面应朝向测量摄像机。首先让测量摄像机测量并记录下棋盘标靶的初始位置，然后让棋盘标靶在三轴直线位移装置的一个轴上移动一标准位移，再由测量摄像机读取该棋盘靶标的移动位移，连续读取 3 次取平均值，该平均值与标准位移之差为位移误差。标准位移可在 (1 ~ 50) mm 范围内大致均匀选择 3 段，如 5mm、20mm、45mm，取最大误差值为该轴位移误差校准结果。同理，在其它两个轴上分别进行同样的校准，计算各轴位移误差。

6 校准结果表达

经校准的测量摄像机出具校准证书。校准证书内容及内页格式见附录 E。

7 复校时间间隔

测量摄像机复校时间间隔可根据实际使用情况由使用单位确定，建议复校时间间隔最长一般不超过 1 年。

福建省计量规范技术委员会

附录 A

典型仪器技术参数

测量摄像机典型仪器的技术参数见表 A.1。

表 A.1 典型仪器技术参数

项 目		技 术 参 数
测 距 误 差		$\pm (2\text{mm}+5 \times 10^{-6}D)$
空间坐标测量误差	标准尺测量	$\pm (3\text{mm}+1 \times 10^{-4}L)$
	标准基线测量	
图像测量误差	水平、竖直	$\pm (3\text{mm}+1 \times 10^{-3}L)$
	斜向	$\pm (3\text{mm}+2 \times 10^{-3}L)$
位移误差		$\pm 1.5\text{mm}$
注：D—棱镜距测量摄像机距离； L—实时视频或截取图像中被测目标的尺寸。		

附录 B

标 靶

B.1 方块标靶

方块标靶由 4 个正方形方块组成，其中两对角方块为黑色，另两个对角方块为白色，标靶的中心点必须落在对中基座的对中轴线上，如图 B.1 所示。每个方块的边长 L 不小于 30mm，表面为哑光。

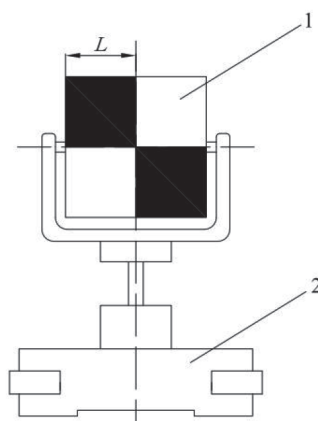


图 B.1 方块标靶

1—方块标靶；2—对中基座

B.2 棋盘标靶

棋盘标靶由多个黑白相互交替的正方形方块组成，方块数不小于 6×6 ，如图 B.2 所示。每个方块的边长 L 不小于 30mm，表面为哑光。

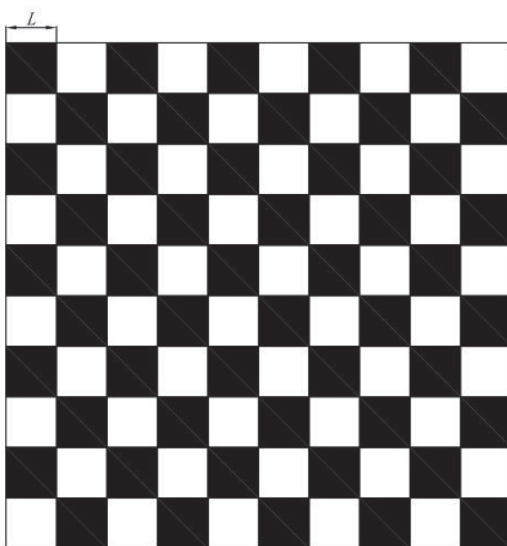


图 B.2 棋盘标靶

附录 C

三轴直线位移装置 (示例)

三轴直线位移装置示意图如图 C.1 所示, 三轴 (上下、左右、前后) 相互垂直, 各轴的技术参数见表 C.2。

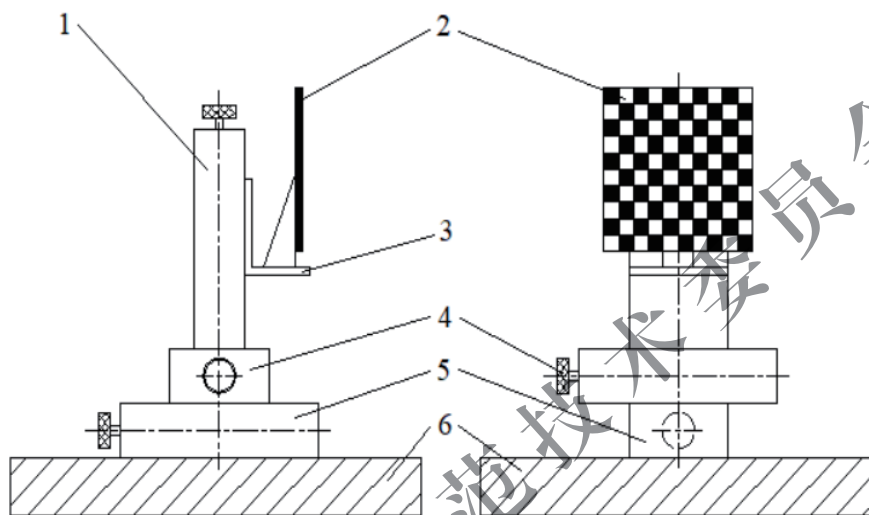


图 C.1 三轴直线位移装置示意图

1—上下位移轴；2—棋盘标靶；3—托盘；4—左右位移轴；5—前后位移轴；6—底座

表 C.2 三轴直线位移装置技术参数

位移轴	分度值或分辨率	行程	最大允许误差
上下、左右、前后	不大于 0.05mm	不小于 50mm	$\pm 0.2\text{mm}$

三轴直线位移装置可采用大量程指示表或激光干涉仪进行校准, 校准时各轴分别进行。在行程范围内大致均匀分布 5 点, 先调整好大量程指示表或激光干涉仪的轴线与被检轴的轴线平行, 首先按正行程检, 计算各点正行程的示值误差, 适当越程后再反行程检, 计算各点反行程的示值误差, 取正反行程中示值误差最大值与最小值之差为该轴示值误差校准结果。

附录 D

校准记录格式 (式样)

表 D.1 校准记录格式

委托方名称					
委托方地址					
制造厂					
型号规格		仪器编号			
环境温度		℃	湿度		% RH
技术依据					
标准器					
1. 测距误差	基线长度 D/m				
	测距值 Δ/m				
	测距误差 $/m$				
	不确定度 $U/m, k=2$				
2.1 空间坐标测量误差 (标准尺测量) $D_c \approx 5m$	长度标准值 L/mm				
	空间测量 值 $/mm$	水平 (4组)			
		竖直 (2组)			
		斜向 (2组)			
	测量误差 $/mm$ δ_{max}	水平			
		竖直			
		斜向			
不确定度 $U/mm, k=2$					
2.2 空间坐标测量误差 (标准尺测量) $D_c \approx 30m$	长度标准值 L/mm				
	空间测量 值 $/mm$	水平			
		竖直			
		左斜			
		右斜			
	测量误差 $/mm$	水平			
		竖直			
		左斜			
		右斜			
不确定度 $U/mm, k=2$					

表 D.1 (续)

2.3 空间坐标测量误差 (标准基线测量)	距离标准值 L/m					
	空间测量值 $/m$ (3 处)					
	测量误差 $/m$ δ_{\max}					
	不确定度 U/m , $k=2$					
3. 图像测量误差	长度标准值 L/mm					
	图像测量值 $/mm$	水 平				
		竖 直				
		斜 向				
	测量误差 $/mm$	水 平				
		竖 向				
		斜 向				
不确定度 U/mm , $k=2$						
4.1 位移误差 (上下方向)	标准位移值 S/mm					
	位移读取均值 $/mm$					
	位移误差 $/mm$					
	不确定度 U/mm , $k=2$					
4.2 位移误差 (左右方向)	标准位移值 S/mm					
	位移读取均值 $/mm$					
	位移误差 $/mm$					
	不确定度 U/mm , $k=2$					
4.3 位移误差 (前后方向)	标准位移值 S/mm					
	位移读取均值 $/mm$					
	位移误差 $/mm$					
	不确定度 U/mm , $k=2$					

附录 E

校准证书内容及内页格式

E.1 校准证书至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室的名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- 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) 校准结果仅对校准对象有效的声明；
- p) 未经校准实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。

E.2 推荐的校准证书内页格式：

推荐的校准证书内页格式见表 E.1

表 E.1 校准证书校准结果内页格式

序号	校准项目	校准结果	不确定度 U
1	测距误差		
2	空间坐标测量误差		
3	图像测量误差		
4	位移误差		

附录 F

测量结果不确定度评定 (示例)

F.1 测距误差校准结果不确定度评定

F.1.1 测量方法

测距误差在室内长导轨基线上进行,在距测量摄像机约5m处设置起始测点,并在(5~50)m范围内大致均匀分布5个测点。首先测出起始点到测量摄像机的距离,再依次测出其它各测点到测量摄像机的距离,通过比较各测点的相对距离值与标准基线的标准值计算测距误差。

F.1.2 测量模型

$$e = \Delta - D \quad (\text{F.1.1})$$

式中:

e ——测距误差, m;

Δ ——测点至起始测点的距离, m;

D ——测点至起始测点的基线标准值, m。

F.1.3 方差和灵敏系数

引起测量结果不确定度的各分量彼此独立, 故:

$$u_c^2 = c_1^2 u^2(\Delta) + c_2^2 u^2(D) \quad (\text{F.1.2})$$

灵敏系数: $c_1 = \frac{\partial e}{\partial \Delta} = 1$; $c_2 = \frac{\partial e}{\partial D} = -1$ 。

F.1.4 不确定度分量的评定

F.1.4.1 测量重复性引入的不确定度 u_1

在距测量摄像机约30m处安置反射棱镜,用测量摄像机视频画面的十字丝照准反射棱镜中心并测量出距离值,重复测量10次,测量结果为:33.6932m、33.6937m、33.6931m、33.6937m、33.6940m、33.6942m、33.6939m、33.6938m、33.6935m、33.6935m,10次测量结果根据贝塞尔公式计算标准偏差 s ,由于校准时取3次测量结果的平均值,且需要计算相对起点的距离,则:

$$u_1 = \frac{\sqrt{2}s}{\sqrt{3}} = 0.28\text{mm}$$

F.1.4.2 气象条件引入的不确定度 u_2

长导轨基线以因瓦标准尺为标准器,在室内条件下,气象条件对长导轨基线的影响量很小可忽略不计,但对测量摄像机的激光测距结果有一定的影响,一般认为温度和气压是激光测距误差的主要影响量,当温度变化1℃或气压变化340Pa时,可产生

10^{-6} 的测距影响。与标准气象条件相比, 假设气压的变化为 $\pm 340\text{Pa}$, 室内温度的变化为 $\pm 5^\circ\text{C}$, 在 50m 范围内按均匀分布估计, 则:

$$u_2 = \frac{50 \times 10^3 \times 10^{-6} \times (5+1)}{\sqrt{3}} = 0.17\text{mm}$$

F.1.4.3 安装误差引入的不确定度 u_3

棱镜安装好后, 存在一定的对中误差, 假设对中误差均在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内, 按均匀分布估计, 则:

$$u_3 = \frac{0.2 \times 2}{\sqrt{3}} = 0.23\text{mm}$$

F.1.4.4 标准器示值误差引入的不确定度 u_4

根据长导轨基线的溯源证书, 标准器示值测量结果的扩展不确定度为

$U=3\mu\text{m}+2 \times 10^{-6}L$, $k=2$, 当 $L=50\text{m}$ 时:

$$u_4 = \frac{3 + 2 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^6}{2} = 51.5\mu\text{m} = 0.05\text{mm}$$

F.1.4.5 标准器示值稳定性引入的不确定度 u_5

长导轨基线标准器的年稳定性一般不大于 $0.02\text{mm}+1 \times 10^{-5}L$, 当 $L=50\text{m}$ 时按均匀分布估计, 则:

$$u_5 = \frac{0.02 + 1 \times 10^{-5} \times 50 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 0.30\text{mm}$$

F.1.5 标准不确定度一览表

见表 F.1.1。

表 F.1.1 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	标准不确定度值 $u(x_i)$ /mm	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$ /mm
$u(\Delta)$	u_1	测量重复性引入的不确定度	1	0.28
	u_2	气象条件引入的不确定度		0.17
	u_3	安装误差引入的不确定度		0.23
$u(D)$	u_4	标准器示值误差引入的不确定度	-1	0.05
	u_5	标准器示值稳定性引入的不确定度		0.30

F.1.6 合成标准不确定度

上述各不确定度分量相互独立不相关, 则:

$$\begin{aligned}
 u_c &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} \\
 &= \sqrt{0.28^2 + 0.17^2 + 0.23^2 + 0.05^2 + 0.30^2} \\
 &= 0.50\text{mm}
 \end{aligned}$$

F.1.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度：

$$U = u_c \times k = 0.50 \times 2 = 1.0\text{mm}$$

F.1.8 校准结果不确定度报告

(5 ~ 50) m 范围内测距误差校准结果不确定度报告为：

$$U = 1.0\text{mm}, k=2。$$

F.2 空间坐标测量误差校准结果不确定度评定

F.2.1 测量方法

空间坐标测量误差以标准尺测量为例，在距测量摄像机约 30m 处水平放置标准尺，从实时视频中测量标准尺中一段刻线间的长度，通过比较测出的长度值与标准尺刻线间的长度标准值计算示值误差。

F.2.2 测量模型

$$\delta = L - A \quad (\text{F.2.1})$$

式中：

δ ——空间坐标测量误差，mm；

L ——长度测量值，mm；

A ——长度标准值 mm。

F.2.3 方差和灵敏系数

引起测量结果不确定度的各分量彼此独立，故：

$$u_c^2 = c_1^2 u^2(L) + c_2^2 u^2(A) \quad (\text{F.2.2})$$

$$\text{灵敏系数： } c_1 = \frac{\partial \delta}{\partial L} = 1; \quad c_2 = \frac{\partial \delta}{\partial A} = -1。$$

F.2.4 不确定度分量的评定

F.2.4.1 测量重复性引入的不确定度 u_1

在距测量摄像机约 30m 处水平放置标准尺，在标准尺中选择一段 1.2m 的刻线间隔，用测量摄像机的实时视频测出该段距离值，重复测量 10 次，测量结果为：1.2022m、1.2023m、1.2027m、1.2025m、1.2024m、1.2026m、1.2021m、1.2025m、1.2021m、1.2028m，10 次测量结果根据贝塞尔公式计算标准偏差 s ，因取 3 次测量结果平均值，则：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.14\text{mm}$$

F.2.4.2 温度偏离引入的不确定度 u_2

标准尺为铝合金材质，当温度偏离其校准温度 20°C 时会有热膨胀影响，已知铝合金的热膨胀系数为 $23.2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，假设温度偏离为 $\pm 10^\circ\text{C}$ （室外），均匀分布，在标准尺 2m 范围内，则：

$$u_2 = \frac{23.2 \times 10^{-6} \times 10 \times 2 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 0.27\text{mm}$$

F.2.4.3 标准器误差引入的不确定度 u_3

标准尺厘米分度任意两刻线间距误差不大于 $\pm 0.6\text{mm}$ ，按均匀分布估计，则：

$$u_3 = \frac{0.6}{\sqrt{3}} = 0.35\text{mm}$$

F.2.5 标准不确定度一览表

见表 F.2.1。

表 F.2.1 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	标准不确定度值 $u(x_i)$ /mm	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$ /mm
$u(L)$	u_1	测量重复性引入的不确定度	0.14	1	0.14
$u(A)$	u_2	温度引入的不确定度	0.27	-1	0.27
	u_3	标准器引入的不确定度	0.35		0.35

F.2.6 合成标准不确定度

上述各不确定度分量相互独立不相关，则：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{0.14^2 + 0.27^2 + 0.35^2} = 0.42\text{mm}$$

F.2.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度：

$$U = u_c \times k = 0.42 \times 2 \approx 1.0\text{mm}$$

F.2.8 校准结果不确定度报告

(0 ~ 2) m 范围内视频测量误差校准结果不确定度报告为：

$$U = 1.0\text{mm}, k = 2。$$

F.3 图像测量误差校准结果不确定度评定

F.3.1 测量方法

图像测量误差采用标准尺进行测量，在距测量摄像机约 30m 处放置标准尺。从截取的图像中测量标准尺中一段刻线间的长度，通过比较测出的长度值与标准尺刻线间的长度标准值计算图像测量误差。下面以标准尺水平放置为例对图像测量误差校准结果进行不确定评定。

F.3.2 测量模型

$$\varepsilon = P - A \quad (\text{F.3.1})$$

式中：

ε ——图像测量误差，mm；

P ——图像测量值，mm；

A ——长度标准值，mm。

F.3.3 方差和灵敏系数

引起测量结果不确定度的各分量彼此独立，故：

$$u_c^2 = c_1^2 u^2(P) + c_2^2 u^2(A) \quad (\text{F.3.2})$$

灵敏系数： $c_1 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial P} = 1$ ； $c_2 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial A} = -1$ 。

F.3.4 不确定度分量的评定

F.3.4.1 测量重复性引入的不确定度 u_1

在距测量摄像机约 30m 处水平放置标准尺，在标准尺中选择一段 0.5m 的刻线间隔，用测量摄像机图像测量模式测出该段距离值，重复测量 10 次，测量结果为：0.500m、0.499m、0.499m、0.499m、0.499m、0.500m、0.500m、0.500m、0.501m、0.501m，10 次测量结果根据贝塞尔公式计算标准偏差 s ，因取 3 次测量结果平均值，则：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.46\text{mm}$$

F.3.4.2 温度偏离引入的不确定度 u_2

标准尺为铝合金材质，当温度偏离其校准温度 20℃ 时会有热膨胀影响，已知铝合金的热膨胀系数为 $23.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，假设温度偏离为 $\pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ （室外），均匀分布，在标准尺 2m 范围内，则：

$$u_2 = \frac{23.2 \times 10^{-6} \times 10 \times 2 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 0.27\text{mm}$$

F.3.4.3 标准器误差引入的不确定度 u_3

标准尺厘米分度任意两刻线间距误差不大于 $\pm 0.6\text{mm}$ ，按均匀分布估计，则：

$$u_3 = \frac{0.6}{\sqrt{3}} = 0.35\text{mm}$$

F.3.5 标准不确定度一览表

见表 F.3.1。

表 F.3.1 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	标准不确定度值 $u(x_i)$ /mm	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$ /mm
$u(P)$	u_1	测量重复性引入的不确定度	0.46	1	0.46
$u(A)$	u_2	温度引入的不确定度	0.27	1	0.27
	u_3	标准器引入的不确定度	0.35		0.35

F.3.6 合成标准不确定度

上述各不确定度分量相互独立不相关，则：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{0.46^2 + 0.27^2 + 0.35^2} = 0.64\text{mm}$$

F.3.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度：

$$U = u_c \times k = 0.64 \times 2 \approx 1.3\text{mm}$$

F.3.8 校准结果不确定度报告

(0 ~ 2) m 范围内图像测量误差校准结果不确定度报告为：

$$U = 1.3\text{mm}, k = 2。$$

F.4 位移误差校准结果不确定度评定

F.4.1 测量方法

位移误差采用三轴直线位移装置进行测量，在距测量摄像机约 30m 处放置三轴直线位移装置及棋盘标靶。三轴直线位移装置的前后位移轴与测量摄像机的摄影主光轴大致平行，棋盘标靶的靶面朝向测量摄像机。首先让测量摄像机测量出棋盘标靶的初始位置，然后在三轴直线位移装置的一个轴上移动一标准位移，再由测量摄像机读取棋盘靶标的移动位移，通过比较读取的位移值与标准位移值计算位移测量误差。下面以棋盘标靶上下移动为例对位移误差校准结果进行不确定度评定。

F.4.2 测量模型

$$\sigma = H - S \quad (\text{F.4.1})$$

式中：

σ ——位移误差，mm；

H ——靶标的移动位移值，mm；

S ——标准位移值，mm。

F.4.3 方差和灵敏系数

引起测量结果不确定度的各分量彼此独立，故：

$$u_c^2 = c_1^2 u^2(H) + c_2^2 u^2(S) \quad (\text{F.4.2})$$

$$\text{灵敏系数： } c_1 = \frac{\partial \sigma}{\partial H} = 1; \quad c_2 = \frac{\partial \sigma}{\partial S} = -1。$$

F.4.4 不确定度分量的评定

F.4.4.1 测量重复性引入的不确定度 u_1

选择一段标准位移 20mm，用测量摄像机读取该段位移值，重复读取 10 次，测量结果为：19.5mm、19.3mm、19.0mm、19.7mm、19.0mm、19.4mm、19.8mm、19.1mm、19.0mm、19.5mm，10 次测量结果根据贝塞尔公式计算标准偏差 s ，因取 3 次测量结果平均值，则：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.17\text{mm}$$

F.4.4.2 标准器误差引入的不确定度 u_2

三轴位移装置误差不大于 $\pm 0.2\text{mm}$ ，按均匀分布估计，则：

$$u_2 = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.12\text{mm}$$

F.4.5 标准不确定度一览表

见表 F.4.1。

表 F.4.1 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	标准不确定度值 $u(x_i)$ /mm	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$ /mm
$u(H)$	u_1	测量重复性引入的不确定度	0.17	1	0.17
$u(S)$	u_2	标准器引入的不确定度	0.12	-1	0.12

F.4.6 合成标准不确定度

上述各不确定度分量相互独立不相关，则：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.17^2 + 0.12^2} = 0.21\text{mm}$$

F.4.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度：

$$U = u_c \times k = 0.21 \times 2 \approx 0.5\text{mm}$$

F.4.8 校准结果不确定度报告

(0 ~ 50) mm 范围内位移误差校准结果不确定度报告为：

$$U = 0.5\text{mm}, k = 2。$$

福建省计量规范技术委员会