

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.01.10

# 多类非漫反射表面结构光三维测量系统校准方法

赵慧洁<sup>1</sup>, 杨旭<sup>2</sup>, 李翔<sup>2</sup>, 姜宏志<sup>2</sup>, 李旭东<sup>2\*</sup>

(1.北京航空航天大学人工智能研究院, 北京 100191;

2.北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 国内外现行的结构光三维测量系统校准规范中, 未对被测物表面为多类非漫反射表面情况下的校准方法的规定, 不能完全满足实际校准需求。针对此问题, 本研究团队分析结构光三维测量系统实际校准场景, 从光学特性角度定义半透明表面、高反光表面以及高动态范围反射率表面, 设计不同表面适用的标准器, 根据实际需求具体给出校准方法, 实现了对结构光三维测量系统多类非漫反射表面几何参数测量能力的校准。本研究团队提出的多类非漫反射表面结构光三维测量系统校准方法是对现行结构光三维测量系统校准方法的补充及完善, 为推动结构光三维测量技术向精密化、标准化方向发展起到了重要作用。

**关键词:** 多类非漫反射表面; 结构光三维测量; 测量精度; 半透明; 高反光; 高动态范围反射率; 标准器; 校准方法

中图分类号: TB92; TH74; O43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 01-0147-13

## Calibration methods for structured light 3D measurement systems on multiple types of non-diffuse reflective surfaces

ZHAO Huijie<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>2</sup>, LI Xiang<sup>2</sup>, JIANG Hongzhi<sup>2</sup>, LI Xudong<sup>2\*</sup>

(1. Institute of Artificial Intelligence, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Current domestic and international calibration specifications for structured light 3D measurement systems do not specify calibration methods for scenarios where the surfaces of measured objects are various non-diffuse reflective surfaces, and thus cannot fully meet the actual calibration needs. To address this issue, our research team analyzed the actual calibration scenarios of structured light 3D measurement systems, defined translucent surfaces, highly reflective surfaces and high dynamic range reflectivity surfaces from the perspective of optical properties, and designed standards applicable to different surfaces. In accordance with actual requirements, we formulated specific calibration methods, realizing the calibration of the capability of structured light 3D measurement systems to measure the geometric parameters of various non-diffuse reflective surfaces. The calibration method for structured light 3D measurement systems for various non-diffuse reflective surfaces proposed by our research team supplements and perfects the existing calibration methods for structured light 3D measurement systems, and plays an important role in promoting the development of structured light 3D measurement technology toward precision and standardization.

收稿日期: 2025-11-19; 修回日期: 2025-12-10

基金项目: 航天科技创新基金项目(CE821004)

引用格式: 赵慧洁, 杨旭, 李翔, 等. 多类非漫反射表面结构光三维测量系统校准方法[J]. 计测技术, 2026, 46(1): 147-159.

**Citation:** ZHAO H J, YANG X, LI X, et al. Calibration methods for structured light 3D measurement systems on multiple types of non-diffuse reflective surfaces [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(1): 147-159.



**Key words:** multiple types of non-diffuse reflective surfaces; structured light 3D measurement; measurement accuracy; translucent; high-reflective; high-dynamic range reflectivity; standards; calibration methods

## 0 引言

随着航空、航天、轨道交通<sup>[1-6]</sup>等高端工业制造领域的发展,多类非漫反射表面(例如高反光的多类合金表面<sup>[7-9]</sup>、碳纤维堆叠的低反射率表面<sup>[10-11]</sup>、玻璃纤维制品的半透明表面<sup>[12-13]</sup>等)因其独特的材质特性应用越来越广泛。基于结构光的三维扫描方法凭借其非接触、高精度、数据信息完整的优势,被广泛应用于表面形貌测量、缺陷检测等生产检测任务中<sup>[14]</sup>。

然而,国内外现行的结构光三维测量系统校准规范(包括 VDI/VDE 2634 BLATT 3 《Optical 3D measuring systems》<sup>[15]</sup>、JJF 1951-2021 《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》<sup>[16]</sup>等)仅对被测物表面为漫反射表面情况下的校准方法作出了规定,缺乏被测物表面为多类非漫反射表面情况下的校准方法和依据,导致研究人员难以对结构光三维测量系统测量多类非漫反射表面获得的结果数据进行有效的精度评价。

针对上述问题,本研究团队从光学特性角度出发,定义半透明表面、高反光表面以及高动态范围反射率表面,研制不同表面适用的标准器,根据实际需求有针对性地给出多类非漫反射表面结构光三维测量系统校准方法,为推动结构光三维测量技术高精度、规范化发展提供有力支撑。

## 1 用于半透明表面测量的结构光三维测量系统校准方法

针对具有半透明特性<sup>[17]</sup>的被测物,本文从定义、标准器、校准原理及方法几个方面进行描述。

### 1.1 定义

半透明表面为材料透光率在 10% ~ 90% 之间的物体表面。具有特性如下: 1) 入射光线可通过半透明表面,但无法完全穿透; 2) 在结构光投射下,穿透半透明表面的光线会产生次表面散射效应。

### 1.2 半透明标准器设计

考虑不同测量场景的差异性,设计半球标准器、半透明球棒标准器和半透明球-平面组合标准器,分别用于结构光三维测量系统半透明曲面探测能力、半透明表面距离探测能力和半透明平面探测能力的校准。

参考 GB / T 2410-2008 《透明塑料透光率和雾度的测定》<sup>[18]</sup>,以透光率作为衡量半透明表面半透明特性的关键参数。定义由制造厂商给出的结构光测量系统测量范围立方体的空间对角线长度为  $L_s$ 。标准器的不确定度应不大于被测对象允许误差的 1/3,保证经校准后结构光三维测量系统的测量精度满足微米级要求。定制的半透明表面适用标准器的技术要求如表 1、表 2、表 3 所示,其中半透明球-平面组合标准器模型结构如图 1 所示。

表 1 半透明球标准器

Tab.1 Translucent sphere standards

材质	尺寸大小	透射特性	球径误差
标准器基体材料应具有典型半透明特性,如陶瓷、玉、玻璃等	直径 $(0.02 \sim 0.2)L_s$	透光率 10% ~ 90%, 光源波段 380 ~ 760 nm	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m}$ ( $k = 2$ )

表 2 半透明球棒标准器

Tab.2 Translucent ball bar standards

材质	尺寸大小		透射特性	球径误差	球心距误差
	单视角系统	多视角系统			
标准器基体材料应具有典型半透明特性,如陶瓷、玉、玻璃等	球心距不小于测量范围短边的 1/3	球心距不小于测量范围最短边的 2/3,不大于测量范围对角的 2/3	透光率 10% ~ 90%, 光源波段 380 ~ 760 nm	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m}$ ( $k = 2$ )	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m}$ ( $k = 2$ )

表3 半透明球-平面组合标准器

Tab.3 Translucent sphere-plane combined standards

材质	尺寸大小	透射特性	平面度误差	球径误差	球心-平面 间距误差
标准球具备漫反射特性， 平面具备半透明特性	工作面尺寸不小于 $0.5L_s \times 50 \text{ mm}$	透光率10%~90%，光源 波段380~760 nm	测量不确定 度 $\leq 4 \mu\text{m}$ ( $k=2$ )	测量不确定 度 $\leq 2 \mu\text{m}$ ( $k=2$ )	测量不确定 度 $\leq 5 \mu\text{m}$ ( $k=2$ )

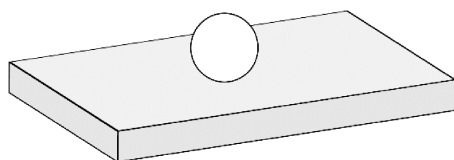


图1 球-平面组合标准器

Fig.1 Sphere-plane combined standards

### 1.3 半透明表面校准原理及方法

#### 1.3.1 半透明球标准器校准法

在结构光三维测量系统的测量范围内均匀分布的8个位置安装半透明球标准器，如图2所示。测量标准球，得到标准球表面的点云数据。分别对各测量位置的点云进行计算，得到拟合球。

所有点到拟合球心距离的最大值  $r_{\max}$  与最小值  $r_{\min}$  之差，为该位置的球形状探测误差  $P_{Fi}$ ，公式为

$$P_{Fi} = r_{\max} - r_{\min} \quad (1)$$

式中： $i$ 为测量位置的序号， $i=1, 2, \dots, 8$ 。

拟合球的直径  $D_{ai}$  与测量球直径参考值  $D_r$  之间的差为该位置的尺寸探测误差  $P_{Si}$ ，公式为

$$P_{Si} = D_{ai} - D_r \quad (2)$$

分别取各位置中形状探测误差和尺寸探测误差的最大者，作为球形状探测误差  $P_F$  和尺寸探测误差  $P_S$  的测量结果，即

$$P_F = \max(P_{Fi}) \quad (3)$$

$$P_S = \max(|P_{Si}|) \quad (4)$$

#### 1.3.2 半透明球标准器校准法

将系统测量范围划分为8个接近的栅格，当测量范围为长方体时，划分方式如图3所示。测量范围不是长方体时，栅格划分也应与长方体划分相对应。球棒上每个球的可测量区域应完全位于1个栅格内，且2个球的可测量区域位于不同的栅格内。

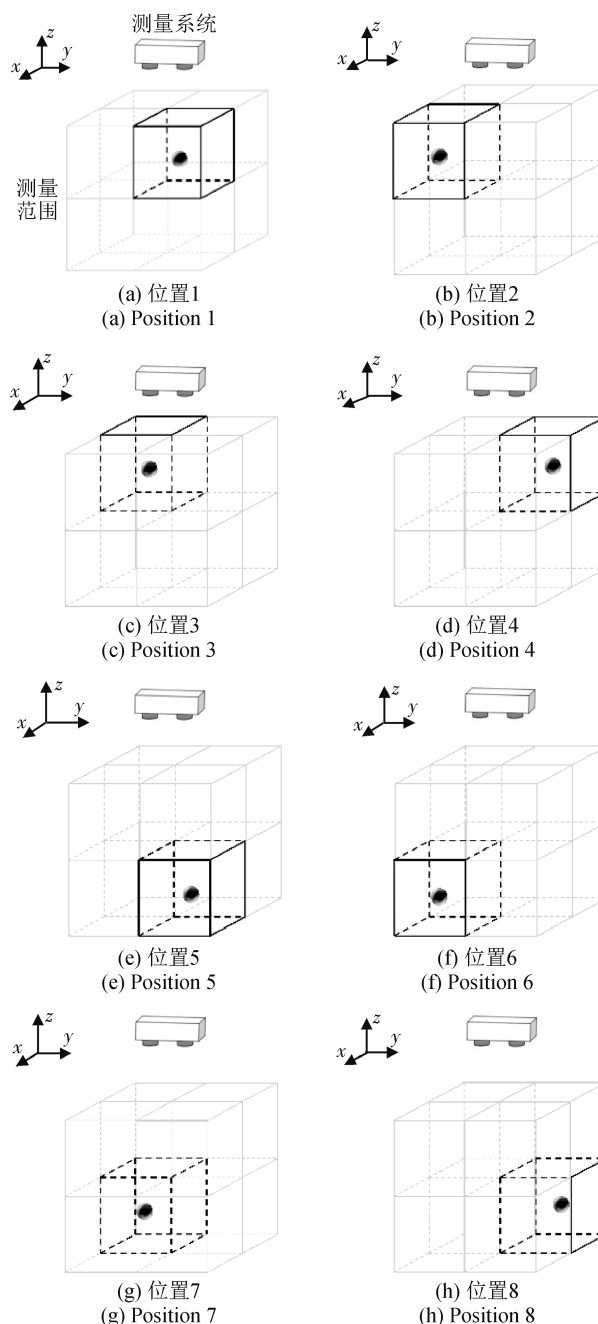


图2 标准球在测量范围内的安装位置

Fig.2 Installation positions of the sphere standards within the measurement range

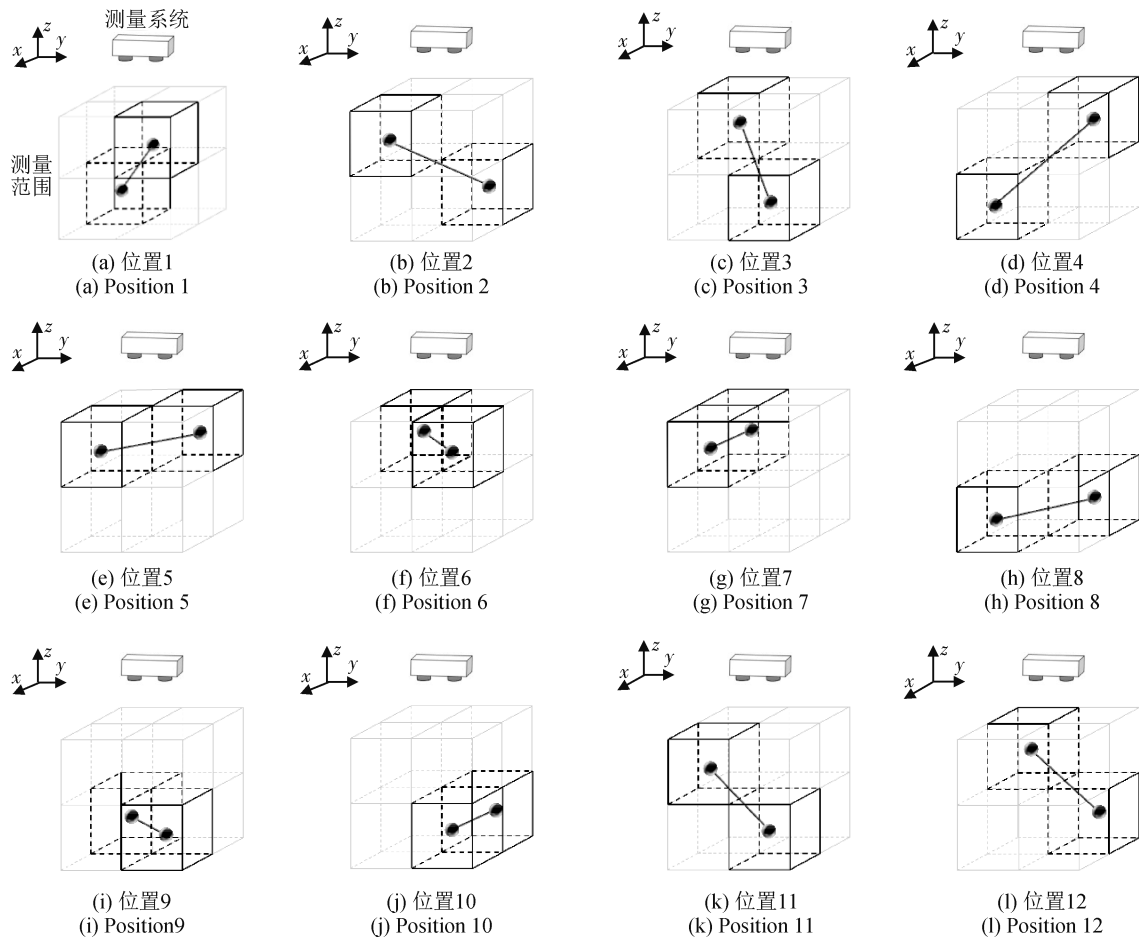


图3 球棒的推荐排列

Fig.3 Recommended arrangement of the ball bar standards

应在测量范围内12个不同位置分别进行测量，计算得到球心距示值误差 $S_{SD}$ 。在每个位置，球棒上至少1个球应接近传感器测量范围的外边缘，且球上至少有25%的点到系统测量范围的外边缘的距离不超过测量范围内最大长度的10%，或球心与系统测量范围外边缘之间的距离不超过测量范围内最大长度的10%；对角线方向的球棒摆放相对于水平面应有显著倾斜。按图3所示布置和测量标准器。

对于测量位置，采用定半径拟合法拟合球心位置。计算球棒在每个位置的球心距，球心距测量示值误差 $S_{SDi}$ 为测量值 $L_{ai}$ 与被测长度校准值 $L_r$ 之差，公式为

$$S_{SDi} = L_{ai} - L_r \quad (5)$$

式中： $i$ 为测量位置的序号， $i = 1, 2, \dots, 12$ 。

取 $S_{SDi}$ 绝对值最大者，作为最终球心距示值误

差 $S_{SD}$ 的测量结果，即

$$S_{SD} = \max(|S_{SDi}|) \quad (6)$$

### 1.3.3 半透明球-平面组合标准器校准法

测量系统光轴平行于 $z$ 轴方向，半透明球-平面组合标准器应在所有测量位置垂直于 $xoz$ 平面。球-平面组合标准器需在测量空间的8个不同位置安装，如图4所示。球-平面组合标准器采用适当的方式固定，避免因不稳定引入测量误差。

测量得到标准平面工作面及标准球的点云数据，计算每个测量方向的最佳拟合平面及标准球球心坐标。以分布在拟合平面两侧的点到拟合平面单侧距离最大值的代数和，作为该位置平面形状探测误差 $F_i$ 。

取各位置中最大值，作为平面形状探测误差 $F$ 的测量结果，即

$$F = \max(F_i) \quad (7)$$

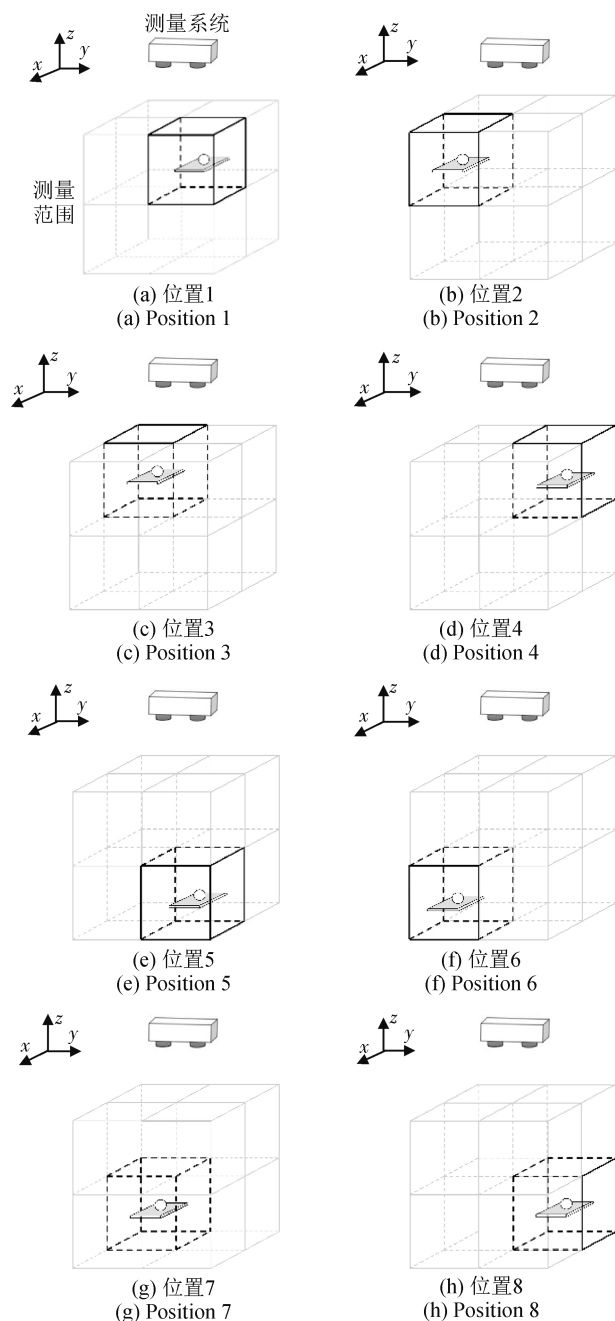


图4 半透明球-平面组合标准器的推荐排列  
Fig.4 Recommended arrangement of the translucent sphere-plane combined standards

式中： $i$ 为测量位置的序号， $i = 1, 2, \dots, 8$ 。

计算每个测量方向的球心到拟合平面之间的距离，球心-平面间距测量示值误差  $S_{SPDi}$  为测量值  $L_{SPDi}$  与被测长度校准值  $L_{SPDr}$  之差，公式为

$$S_{SPDi} = L_{SPDi} - L_{SPDr} \quad (8)$$

将各球心-平面间距测量示值误差中的绝对值最大者，作为最终球心-平面间距测量示值误差  $S_{SPD}$

的测量结果，即

$$S_{SPD} = \max(|S_{SPDi}|) \quad (9)$$

## 2 用于高反光表面测量的结构光三维测量系统校准方法

针对具有高反光特性<sup>[19]</sup>的被测物，本文从定义、标准器、校准原理及方法几个方面进行阐述。

### 2.1 定义

#### 2.1.1 高反光表面定义

高反光表面是指反射率动态范围不小于 50 : 1 的物体表面，其反射光如图 5 所示。

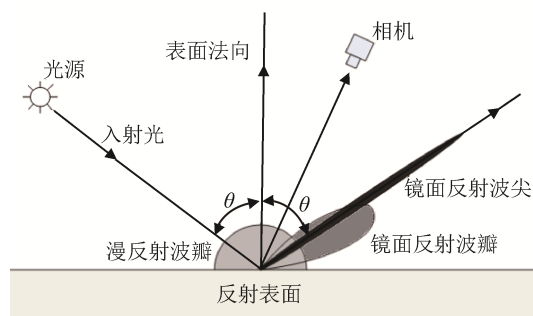


图5 高反光表面反射光示意图  
Fig.5 Schematic diagram of light reflection on high-reflective surfaces

高反光表面特性描述如下：

1) 入射光照射到高反光表面，反射光主要由漫反射波瓣、镜面反射波瓣及镜面反射波尖组成；

2) 相机接收到的镜面反射分量主要由镜面反射波瓣和镜面反射波尖组成，相机接收到的漫反射分量主要由漫反射波瓣组成；

3) 在适当的曝光时间、投影仪投射亮度条件下，结构光三维测量系统的反射率动态范围  $\eta$  定义为

$$\eta = \frac{G_{Grayh} \cdot S_l \cdot L_l}{G_{Grayl} \cdot S_h \cdot L_h} \quad (10)$$

式中： $G_{Grayh}$  为相机接收到镜面反射分量的最大灰度值（该值小于相机饱和灰度值）， $G_{Grayl}$  为相机接收到漫反射分量的最小灰度值（该值大于相机暗噪声）， $S_h$  为相机接收到镜面反射分量的最大灰度值时的曝光时间， $S_l$  为相机接收到漫反射分量的最小灰度值时的曝光时间， $L_h$  为相机接收到镜面反射分量的最大灰度值时的投射亮度， $L_l$  为相机接收到

漫反射分量的最小灰度值时的投射亮度。

2.1.2 多次反射表面定义

多次反射表面为投射光线在表面或内部结构上连续发生2次及以上反射的物体表面，如图6所示。

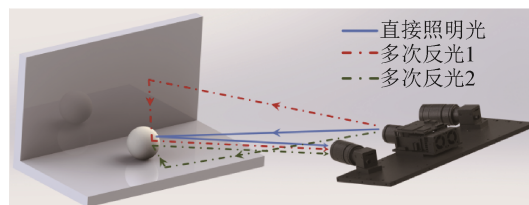


图6 多次反射表面示意图

Fig.6 Schematic diagram of multiple reflection surfaces

2.2 高反光标准器设计

考虑不同测量场景的差异性，设计高反光球标准器、高反光球棒标准器、高反光平面标准器和高反光中空角锥标准器，分别用于结构光三维测量系统高反光曲面探测能力、高反光表面距离探测能力、高反光平面探测能力和多次反射表面测量能力的校准。

参考 GB/T 1031-2009 《产品几何技术规范

(GPS)表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值》<sup>[20]</sup>，以表面粗糙度作为衡量高反光表面特性的关键参数。定制的高反光表面适用标准器技术要求如表4~表7所示，高反光中空角锥标准器模型结构如图7所示。

表4 高反光球标准器

Tab.4 High-reflective sphere standards

材质	加工工艺	尺寸大小	表面粗糙度 $R_a$	球径误差
钢，优选 GCr15、2Cr13 材料	端铣/研磨，无镀膜	直径(0.02 ~ 0.2) $L_s$	$0.1 \leq R_a \leq 0.8$	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m} (k=2)$

表5 高反光球棒标准器

Tab.5 High-reflective ball bar standards

材质	加工工艺	尺寸大小		表面粗糙度 $R_a$	球径误差	球心距误差
		单视角系统	多视角系统			
钢，优选 GCr15、2Cr13 材料	端铣/研磨，无镀膜	球心距不小于测量范围短边的 1/3	球心距不小于测量范围最短边的 2/3，不大于测量范围对角线的 2/3	$0.1 \leq R_a \leq 0.8$	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m} (k=2)$	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m} (k=2)$

表6 高反光平面标准器

Tab.6 High-reflective planar standards

材质	加工工艺	尺寸大小	表面粗糙度 $R_a$	尺寸误差	平面度误差
钢，优选 GCr15、2Cr13 材料	端铣/研磨，无镀膜	工作面尺寸不小于 $0.5L_s \times 50 \text{ mm}$	$0.1 \leq R_a \leq 0.8$	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m} (k=2)$	测量不确定度 $\leq 5 \mu\text{m} (k=2)$

表7 高反光中空角锥标准器

Tab.7 High-reflective hollow corner cube standards

材质	加工工艺	表面粗糙度 $R_a$	尺寸大小	尺寸误差	平面度误差
钢，优选 GCr15、2Cr13 材料	端铣/研磨，无镀膜	$0.1 \leq R_a \leq 0.8$	工作面尺寸不小于 $0.5L_s \times 0.5L_s$	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m} (k=2)$	测量不确定度 $\leq 5 \mu\text{m} (k=2)$

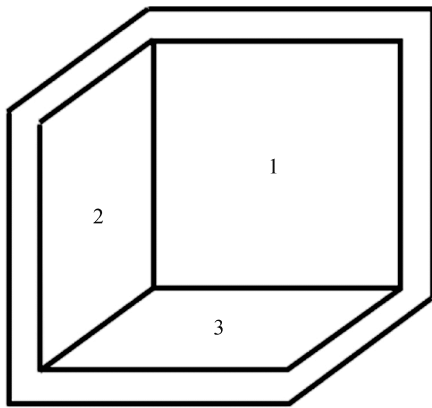


图7 高反光中空角锥标准器

Fig.7 High-reflective hollow corner cube standards

### 2.3 高反光表面校准原理及方法

高反光球标准器和高反光球棒标准器的校准原理与半透明球标准器和半透明球棒标准器类似，下面重点介绍高反光平面标准器校准法及高反光中空角锥标准器校准法。

#### 2.3.1 高反光平面标准器校准法

测量系统光轴平行于 $z$ 轴方向，标准平面应在所有测量位置垂直于 $xoz$ 平面。将系统测量范围划分为8个接近的栅格。当测量范围为长方体时，划分方式如图8所示。如果测量范围不是长方体，栅格也应与长方体划分相对应。标准平面至少在测量空间的6个不同位置安装，如图8所示。

在图8的位置1~位置3中，标准平面垂直于 $z$ 轴，长边对齐 $x$ 轴；在位置4~位置5中，标准平面垂直于 $xz$ 平面对角线，长边平行于该对角线；在位置6中，标准平面垂直于 $xyz$ 空间对角线，长边平行于该对角线。

测量得到标准平面工作面的点云数据，计算每个测量方向的最佳拟合平面。以分布在拟合平面两侧的点道拟合平面单侧距离最大值的代数和，作为该位置平面形状的探测误差 $F_{si}$ 。

取 $F_{si}$ 中最大值，作为最终平面形状探测误差 $F_s$ 的测量结果，即

$$F_s = \max(F_{si}) \quad (11)$$

式中： $i$ 为测量位置的序号， $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

平面测量完整率为结构光三维测量系统在指定扫描条件下，对标准平面表面有效点云数据的捕获能力，表征为有效点云面积与理论平面面积的百

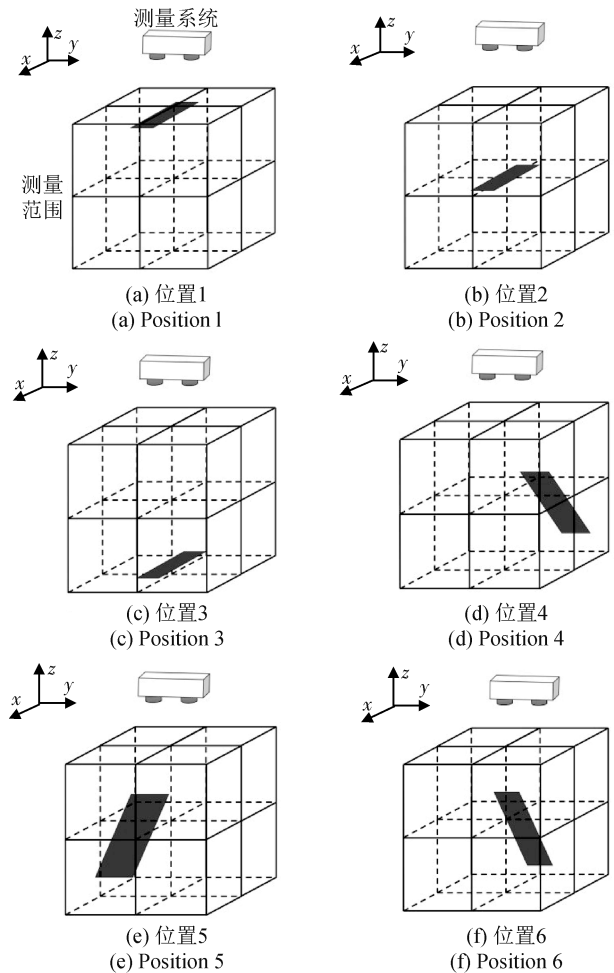


图8 标准平面的推荐排列

Fig.8 Recommended arrangement of the planar standards

分比。各位置平面测量完整率 $C_{Comp_{si}}$ 可以表示为

$$C_{Comp_{si}} = \frac{A_{ai}}{A_r} \quad (12)$$

式中： $A_{ai}$ 为测量点云表征的实测面积， $A_r$ 为标准平面的测量视场区域面积。

取 $C_{Comp_{si}}$ 中的最小值，作为最终平面测量完整率 $C_{Comp_s}$ 的测量结果，即

$$C_{Comp_s} = \min(C_{Comp_{si}}) \quad (13)$$

式中： $i$ 为位置的序号， $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

#### 2.3.2 高反光中空角锥标准器校准法

高反光中空角锥标准器应位于测量范围内，并且应从不少于3个方向测量高反光中空角锥标准器的3个内表面，如图9所示，测量点云应完整地覆盖高反光中空角锥标准器的表面。

利用测量到的点云拟合计算平面。取各平面中误差绝对值最大者作为平面形状探测误差 $F_m$ 的

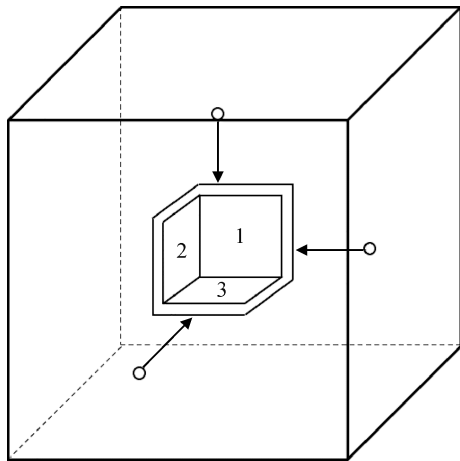


图9 测量方向示意图

Fig.9 Schematic diagram of measurement directions

测量结果, 即

$$F_m = \max(F_{mk}) \quad (14)$$

式中:  $F_{mk}$  为各平面的形状探测误差, 其中  $k$  为不同平面的序号,  $k = 1, 2, 3$ 。

平面测量完整率  $C_{Comp\ m\ k}$  可以表示为

$$C_{Comp\ m\ k} = \frac{A_{ak}}{A_r} \quad (15)$$

取  $C_{Comp\ m\ k}$  中最小值, 作为平面测量完整率  $C_{Comp\ m}$  的测量结果, 即

$$C_{Comp\ m} = \min(C_{Comp\ m\ k}) \quad (16)$$

### 3 用于高动态范围反射率表面测量的结构光三维测量系统校准方法

针对具有高动态范围反射特性<sup>[21]</sup>的被测物, 本文从定义、标准器、校准原理及方法几个方面进行描述。

#### 3.1 定义

高动态范围反射率表面是指反射率动态范围  $\eta$  不小于 1 000 : 1 时的物体表面, 其特性描述如下:

1) 高动态范围反射率表面的可见光波段入射光在表面局部区域发生镜面反射, 其他区域呈低漫反射特性;

2) 入射光照射到高动态范围反射率表面, 反射光主要由漫反射波瓣、镜面反射波瓣及镜面反射波尖组成;

3) 相机接收到的镜面反射分量主要由镜面反射波瓣和镜面反射波尖组成, 相机接收到的漫反射分量主要由漫反射波瓣组成;

4) 在适当的曝光时间、投影仪投射亮度条件下, 结构光三维测量系统的反射率动态范围  $\eta$  定义见式(10)。

#### 3.2 高动态范围反射率标准器设计

考虑不同测量场景的差异性, 设计反射率球标准器、反射率球板标准器和反射率平面标准器, 分别用于结构光三维测量系统高动态范围反射率表面探测能力、高动态范围反射率表面距离探测能力和高动态范围反射率表面平面探测能力的校准。

高动态范围反射率标准器将反射率动态范围  $\eta$  从高反光表面标准器的 50 : 1 增大到 1 000 : 1, 使用此标准器可对结构光三维测量系统面向反射现象明显、镜面反射-低漫反射混杂等表面的测量能力进行有效校准。

参考 GB/T 1031-2009 《产品几何技术规范 (GPS) 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值》<sup>[20]</sup>, 以表面粗糙度作为衡量高动态范围反射特性的关键参数。定制的高动态范围反射率表面标准器技术要求如表 8 ~ 表 10 所示, 其中, 反射率球板标准器和反射率平面标准器模型结构分别如图 10 ~ 图 11 所示。

标准球板上至少包含钢和碳化硅等不同反射率材质的球组, 以满足视场内测量高动态范围反射率表面的要求, 如图 10 所示。

标准平面应由钢和碳化硅等不同反射率材质制成, 中间为碳化硅, 外围为钢, 满足测量视场内测量反射率表面的要求, 如图 11 所示。

表8 反射率球标准器

Tab.8 Reflectivity sphere standards

材质	加工工艺	尺寸大小	表面粗糙度 $R_a$	球径误差
钢, 优选 GCr15、2Cr13 材料	端铣/研磨, 无镀膜	直径(0.02 ~ 0.2) $L_s$	$0.1 \leq R_a \leq 0.8$	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m} (k = 2)$

表9 反射率球板标准器  
Tab.9 Reflectivity ball plate standards

材质		加工工艺	尺寸大小	表面粗糙度 $R_a$		球径误差	球心距误差
标准球	基板			钢质	碳化硅等		
钢、碳化硅等	陶瓷、碳纤维等	端铣/研磨, 无镀膜	最大球心距离不小于测量短边的1/3	$0.1 \leq R_a \leq 0.8$	$0.1 \leq R_a \leq 0.8$	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m}$ ( $k=2$ )	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m}$ ( $k=2$ )

表10 反射率平面标准器  
Tab.10 Reflectivity planar standards

材质	加工工艺	尺寸大小	表面粗糙度 $R_a$		尺寸误差	平面度误差
			钢质	碳化硅等		
钢、碳化硅等	端铣/研磨, 无镀膜	工作面尺寸不小于 $0.5L_s \times 50 \text{ mm}$	$0.1 \leq R_a \leq 0.8$	$0.1 \leq R_a \leq 0.8$	测量不确定度 $\leq 2 \mu\text{m}$ ( $k=2$ )	测量不确定度 $\leq 5 \mu\text{m}$ ( $k=2$ )



图10 标准球板示意图

Fig.10 Schematic diagram of the reflectivity ball plate standards

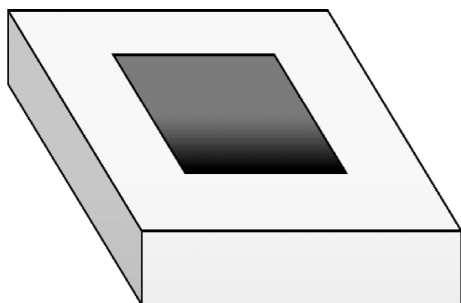


图11 标准平面示意图

Fig.11 Schematic diagram of the reflectivity planar standards

### 3.3 高动态范围反射率表面校准原理及方法

反射率球标准器和反射率平面标准器的校准原理与高反光球标准器和高反光平面标准器类似, 下面重点介绍反射率球板标准器校准法。

将系统测量范围划分为8个接近的栅格, 当测量范围为长方体时, 划分方式如图12所示。测量范围不是长方体时, 栅格划分也应与长方体划分相对应。球板上每个球的可测量区域应完全位于1个栅格内, 且多个球的可测量区域位于不同的栅格内。

应在测量范围内的12个不同位置分别进行测量, 计算得到球心距示值误差。在每个位置, 球板上至少1个球应接近传感器测量范围的外边缘, 且该球上至少有25%的点到系统测量范围外边缘的距离不超过测量范围内最大长度的10%, 或球心与系统测量范围外边缘之间的距离不超过测量范围内最大长度的10%; 对角线方向的球板摆放相对于水平面应有显著倾斜。

获取测量位置点云后, 采用定半径拟合法拟合球心位置。计算球板在每个位置的球心距, 球心距示值误差  $S_{SD\ i b_j}$  为测量值  $L_{alb_j}$  与被测长度校准值  $L_{rb_j}$  之差, 公式为

$$S_{SD\ i b_j} = L_{alb_j} - L_{rb_j} \quad (17)$$

式中:  $i$  为测量位置的序号,  $i = 1, 2, \dots, 12$ ;  $b, j$  均为测量球板上球的序号,  $b = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  为球板上球的数量。

取各球心距示值误差中绝对值最大者, 作为该位置下球心距示值误差  $S_{SD\ i}$  的测量结果, 即

$$S_{SD\ i} = \max(|S_{SD\ i b_j}|) \quad (18)$$

取各位置中  $S_{SD\ i}$  最大者, 作为最终球心距示值误差  $S_{SD}$  的测量结果, 即

$$S_{SD} = \max(|S_{SD\ i}|) \quad (19)$$

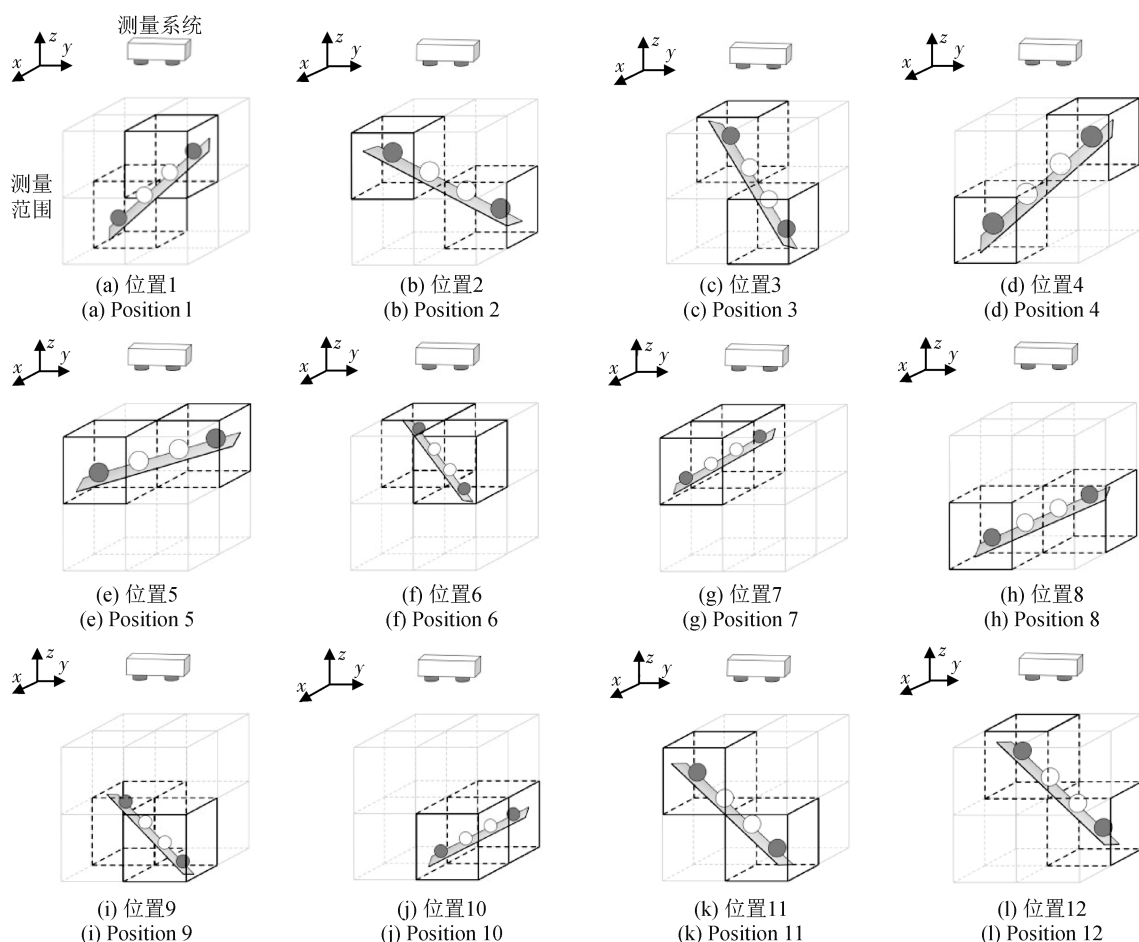


图 12 球板的推荐排列

Fig.12 Recommended arrangement of the ball plate standards

## 4 结论

针对目前结构光三维测量系统校准规范未涵盖被测物表面为多类非漫反射表面情况下的校准方法的问题,设计了半透明表面、高反光表面及高动态范围反射率表面标准器,具体介绍了各标准器的材质、加工工艺、尺寸大小等参数信息,根据实际需求给出多类非漫反射表面结构光三维测量系统校准方法,实现高精度量值溯源。研究成果为推动结构光三维测量系统在高端工业制造领域的广泛应用提供了重要支撑。

需要指出的是,本文设计的标准器以及提出的方法只对应适用于文中提出的可定义的被测表面情况下的校准,未来需要针对被测表面具有其他特殊性质(例如物体厚度值极小、光学特性更加复杂等)情况下的校准方法进一步开展研究。

## 参考文献

- [1] SUO S X, QIAO K, QIN L T, et al. Structure and depth-based blade detection algorithm for multistage aeroengine fan blade detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 5033413.
- [2] 赵洪伟, 胡鹏宇, 杨树明, 等. 基于面结构光的飞机舱门间隙测量技术与应用[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1045-1051.  
ZHAO H W, HU P Y, YANG S M, et al. Measurement technology and application of aircraft door gap based on surface structured light[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(3): 1045-1051. (in Chinese)
- [3] 洪海波, 万舒彪, 沈义平, 等. 基于光度-面结构光复合传感的大型航天构件机器人原位测量方法[J]. 航天制造技术, 2022(5): 18-21.  
HONG H B, WAN S B, SHEN Y P, et al. Photometric and surface structure light composite sensing based robot in-situ measurement method for large aerospace component

- [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2022 (5): 18–21. (in Chinese)
- [4] ZHOU P, XU K, WANG D D. Rail profile measurement based on line-structured light vision [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 16423–16431.
- [5] 谭毅, 严海源, 杨延竹, 等. 基于结构光的白车身面差三维测量方法[J]. *工具技术*, 2022, 56(2): 87–90.  
TAN Y, YAN H Y, YANG Y Z, et al. Three-dimensional measurement method of body-in-white surface difference based on structured light [J]. *Tool Engineering*, 2022, 56(2): 87–90. (in Chinese)
- [6] 张启灿, 吴周杰, 王亚军, 等. 基于条纹结构光照明的复杂场景三维形貌精准测量技术研究进展[J/OL]. *计测技术*, 2026, 1[2026-01-30]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MXvIvFkaDQyUxWojtFdafn84JB6w1pnBVRy4JodA2M3zrpV-QLpu02UpnovDwYNyaS-mteQ0CuRBde2phidicKweVhV7yq2BsNt0BRbhZdSATws-JQsXpuTN34dqJ0G\\_tg2irhUwQDP2UFNKkOpTZ3qm4kdIrblyZzQnGMG7Hr2YWx7mEwYWy1g== &uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MXvIvFkaDQyUxWojtFdafn84JB6w1pnBVRy4JodA2M3zrpV-QLpu02UpnovDwYNyaS-mteQ0CuRBde2phidicKweVhV7yq2BsNt0BRbhZdSATws-JQsXpuTN34dqJ0G_tg2irhUwQDP2UFNKkOpTZ3qm4kdIrblyZzQnGMG7Hr2YWx7mEwYWy1g== &uniplatform=NZKPT&language=CHS).  
ZHANG Q C, WU Z J, WANG Y J, et al. Research progress on precise three-dimensional shape measurement technology for complex scenes based on structured light illumination [J/OL]. *Metrology & Measurement Technology*, 2026, 1[2026-01-30]. (in Chinese)
- [7] YANG Y F, WU L, YI S M, et al. 3D measurement for high reflective aerospace blades based on structured illumination photometric [C]// 2023 29th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). Queenstown, New Zealand. IEEE, 2024: 1–6.
- [8] LIN H B, SONG Z. 3D reconstruction of specular surface via a novel structured light approach [C]// 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, Lijiang, China. IEEE, 2015: 530–534.
- [9] 汪运, 郭建英, 梁浚哲, 等. 面向高反光表面的结构光面形测量方法[J]. *中国光学*, 2025(1): 42–52.  
WANG Y, GUO J Y, LIANG J Z, et al. Structured light surface shape measurement method for highly reflective surfaces [J]. *Chinese Optics*, 2025(1): 42–52. (in Chinese)
- [10] 刘泽隆, 李茂月, 卢新元, 等. 高动态范围条纹结构光在机检测技术及应用进展[J]. *中国光学*, 2024(1): 1–18.  
LIU Z L, LI M Y, LU X Y, et al. On-machine detection technology and application progress of high dynamic range fringe structured light [J]. *Chinese Optics*, 2024(1): 1–18. (in Chinese)
- [11] WANG H, ZHANG C B, QIAN X, et al. HDRSL net for accurate high dynamic range imaging-based structured light 3D reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2025, 34: 5486–5499.
- [12] HU C P, CHEN R, WU D, et al. Volume-based multisurface 3-D measurement of transparent objects using fringe projection profilometry [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 5037113.
- [13] 何佳燕. 基于深度学习的半透明物体结构光三维测量方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2025.  
HE J Y. Research on 3D measurement methods for translucent objects using structured light based on deep learning [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2025. (in Chinese)
- [14] 赵慧洁, 李宇曦, 姜宏志, 等. 复杂光照条件下的高精度三维成像技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(8): 268–279.  
ZHAO H J, LI Y X, JIANG H Z, et al. High-precision 3D-imaging technology under complex illumination [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 268–279. (in Chinese)
- [15] Verein Deutscher Ingenieure/Verband der Elektrotechnik. Optical 3D measuring systems: VDI/VDE 2634 BLATT 3[S]. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2008.
- [16] 国家市场监督管理总局. 基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范: JJF 1951–2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
State Administration for Market Regulation. Calibration specification for optical 3D measurement systems based on structured light scanning: JJF 1951–2021 [S]. Beijing: China Standards Press, 2021. (in Chinese)
- [17] 中国光学工程学会. 用于半透明表面测量的结构光三维测量系统校准方法: T/CSOE 0006–2025[S]. 北京, 2025.  
Chinese Society of Optical Engineering. Calibration method for structured light 3D measurement system applied to translucent surface measurement: T/CSOE 0006–2025[S]. Beijing, 2025. (in Chinese)
- [18] 全国塑料标准化技术委员会(SAC/TC 15). 透明塑料透光率和雾度的测定: GB/T 2410–2008[S]. 中国标准出版社, 2008.  
National Technical Committee for Standardization of Plas-

tics (SAC/TC 15). Determination of light transmittance and haze for transparent plastics: GB/T 2410-2008 [S]. China Standards Press, 2008. (in Chinese)

- [19] 中国光学工程学会. 用于高反光表面测量的结构光三维测量系统校准方法: T/CSOE 0008-2025 [S]. 北京, 2025.

Chinese Society of Optical Engineering. Calibration method for structured light 3D measurement system for highly reflective surface measurement: T/CSOE 0008-2025 [S]. Beijing, 2025. (in Chinese)

- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 产品几何技术规范(GPS) 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值: GB/T 1031-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Geometrical Product Specifications (GPS) — surface texture — profile method — surface roughness parameters and their values: GB/T 1031-2009 [S]. Beijing: China Standards Press, 2009. (in Chinese)

- [21] 中国光学工程学会. 用于高动态范围反射率表面测量的结构光三维测量系统校准方法: T/CSOE 0009-2025 [S]. 北京, 2025.

Chinese Society of Optical Engineering. Calibration method for structured light 3D measurement of High Dynamic Range (HDR) reflective surfaces: T/CSOE 0009-2025 [S]. Beijing, 2025. (in Chinese)

## 附录 A

### 典型表面测量结果

根据 VDI/VDE 2634 BLATT 3 《Optical 3D measuring systems》、JJF 1951-2021 《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》对某结构光三维测量系统进行有效校准, 并利用此校准后的测量系统对多类非漫反射表面进行测量, 具体测量结果如下。

#### A.1 多类非漫反射表面测量结果

采用标准漫反射球棒(经校准两球心距实测值为 120.323 2 mm,  $U = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $k = 2$ )对 ATOS 型三维测量系统(如图 A.1 所示)进行校准标定。多次

测量后, 球心距示值误差为 0.012 mm, 证明了此系统对漫反射表面的测量能力。

利用此校准后的系统对高光/多次反光样品、半透明样品进行测量。被测实物如图 A.2 所示。

测量后点云如图 A.3 所示。



图 A.1 ATOS 型三维测量系统

Fig.A.1 ATOS 3D measuring system

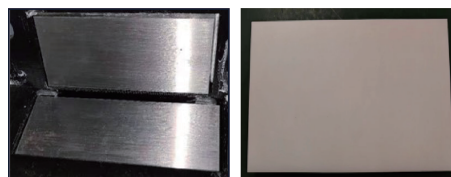


图 A.2 高光/多次反光样品、半透明样品实物图

Fig.A.2 Multi-reflective / high-reflective, translucent samples physical prototype image



图 A.3 高光/多次反光样品、半透明样品测量点云

Fig.A.3 Multi-reflective / high-reflective, translucent samples measured point cloud

#### A.2 结论

由于缺少实际样品经校准真值, 无法计算准确平面测量完整率。但对比图 A.2 和图 A.3 可知, 在测量多类非漫反射表面时, 经漫反射表面标准器校准的结构光三维测量系统, 测量点云无法满足实际使用需求。

## 附录 B

### 不确定度评定示例

使用半透明球标准器进行结构光三维测量系

统的校准,其不确定度评定示例如下。

### B.1 测量方法

对国内生产的某用于半透明表面测量的结构光三维测量系统进行校准,其测量空间为400 mm × 200 mm × 200 mm。选用直径为50 mm的半透明标准器,在测量范围内,按照图2的方法,分别放置于测量空间的8个不同位置进行测量。

球直径参考值为49.850 mm,测量不确定度为2.0 μm,线膨胀系数为 $(8.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。测量时环境温度为 $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ ,温度测量误差不超过 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,结构光三维测量系统具有温度补偿功能。测量时无其他明显的影响因素。

### B.2 测量模型

测量模型如式(B.1)所示。

$$P_s = \max(|P_{si}|) = \max(|D_i - D|) \quad (1)$$

式中: $D_i$ 为第*i*次测量球尺寸测量值, $D$ 为半透明标准球球尺寸的参考值。

### B.3 合成标准不确定度计算公式

合成标准不确定度 $u_c(P_s)$ 计算公式为

$$u_c(P_s) = \max[u(P_{si})] \quad (2)$$

$$u(P_{si}) = \sqrt{u^2(D_i) + u^2(D)} \quad (3)$$

式中: $u(P_{si})$ 为分项不确定度, $u(D_i)$ 为测量重复性引入的标准不确定度, $u(D)$ 为标准器引入的标准不确定度。

通过5次重复测量固定标准球,计算测量重复性引入的标准不确定度 $u(D_i)$ 为

$$u(D_i) = \frac{s(D_i)}{\sqrt{5}} = 1 \mu\text{m} \quad (4)$$

式中: $s(D_i)$ 为多次重复测量球直径的实验标准偏差。

标准器引入的标准不确定度 $u(D)$ 可分为球尺寸参考值引入的标准不确定度分量 $u_1(D)$ 、球温度变化引入的标准不确定度分量 $u_2(D)$ 、球的线膨胀系数测量误差引入的标准不确定度分量 $u_3(D)$ 。

其中球尺寸参考值的测量不确定为2.0 μm,包含因子 $k_1 = 2$ ,则

$$u_1(D) = \frac{2.0 \mu\text{m}}{2} = 1.0 \mu\text{m} \quad (5)$$

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

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

线膨胀系数在半宽区间 $1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 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

$$u_3(D) = \frac{49.850 \text{ mm} \times 5 \text{ }^\circ\text{C} \times 1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{6}} \approx 0.10 \mu\text{m} \quad (7)$$

可得

$$u(D) = \sqrt{u_1^2(D) + u_2^2(D) + u_3^2(D)} \approx 1.0 \mu\text{m} \quad (8)$$

计算得到

$$u_c(P_s) = \sqrt{u^2(D_i) + u^2(D)} \approx 1.4 \mu\text{m} \quad (9)$$

最终扩展不确定度 $U$ 为

$$U = k u_c(P_s) = 2.8 \mu\text{m} \quad (k = 2) \quad (10)$$

(本文编辑:刘圣晨 刘宇轩)



**第一作者:**赵慧洁(1966—),女,教授,博士,主要研究领域为新型光电探测与载荷技术、高光谱遥感成像建模与仿真、量化遥感反演与应用、近景摄影测量、精密光电测量等,主持国家自然科学基金等项目50余项。获国家科技进步二等奖、校级科技进步二等奖等荣誉;已发表论文120余篇,其中,SCI/EI检索90余篇;申请国家专利50余项,其中,授权国家发明专利25项;参与编写专著2本。



**通信作者:**李旭东(1974—),男,教授,博士,主要研究方向为光电检测及信息处理。获2012年机械工业科学技术发明一等奖。主持国际自然科学基金、国家重点研发计划等项目20余项;获省部级科技奖励一等奖3项、二等奖1项;发表学术论文50余篇,授权国家发明专利40余项。