

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.04.04

# 双镜面面形测量系统的全局优化标定方法

何雯静, 倪育博, 田秀秀, 李梓瑜, 李雁玲, 张宗华\*

(河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

**摘要:** 为实现双镜面物体完整三维面形的高精度测量, 提出一种全局优化系统标定方法。首先, 建立双镜面面形测量系统, 采用2个无公共视场(Field-of-View, FoV)的直接相位偏折测量子系统完整覆盖双镜面物体的被测视角; 然后, 采用传统方法进行子系统的深度标定、横向标定和子系统测量基准间的标定; 最后, 基于高精度双镜面标定物优化初始参数, 引入3个度量误差以评估标定物的三维测量精度, 通过最小化所定义的度量误差, 计算出最佳标定参数。开展对比实验验证全局优化系统标定方法的应用效果, 结果表明: 利用初始系统标定方法得到测量系统参数, 然后重建量块整体三维面形, 得到量块两表面间距离的均方根误差 $R_{\text{RMSE}}$  (Root Mean Square Error, RMSE)为164  $\mu\text{m}$ ; 利用全局优化系统标定方法得到测量系统参数, 然后重建量块整体三维面形, 得到量块两表面间距离的 $R_{\text{RMSE}}$ 为34  $\mu\text{m}$ 。全局优化系统标定方法有效提升了双镜面物体三维面形测量精度, 为提高非共视条件下多传感器光学测量系统的标定准确性提供了技术借鉴。

**关键词:** 双镜面; 面形测量; 直接相位偏折; 系统标定; 全局优化

**中图分类号:** TB92; TH74; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2025) 04-0057-09

## Global optimized calibration method for double-specular-surface shape measurement system

HE Wenjing, NI Yubo, TIAN Xiuxiu, LI Ziyu, LI Yanling, ZHANG Zonghua\*

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** To achieve high-precision measurement of the complete three-dimensional (3D) shape of double-specular-surface objects, a global optimization method for system calibration is proposed. Firstly, a double-specular-surface shape measurement system is established using two direct phase measuring deflectometry subsystems without overlapping Field-of-View (FoV), which fully covers the measured FoV of the double-specular-surface object. Secondly, traditional methods are applied for depth calibration, lateral calibration of each subsystem, and calibration of the transformation between the measurement references of the two subsystems. Finally, a high-precision double-specular-surface calibrator is employed to optimize the initial calibration parameters. Three measurement errors are introduced to evaluate the 3D measurement accuracy of the calibrator. By minimizing the defined measurement errors, the optimal calibration parameters are calculated. Comparative experiments were performed to verify the application effects of the global optimization system calibra-

收稿日期: 2025-05-15; 修回日期: 2025-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2341275, 52075147); 河北省教育厅科学研究项目(JZX2024021); 河北工业大学创新研究院(石家庄)石家庄市科技合作专项基金项目(SJZZXA24008)

引用格式: 何雯静, 倪育博, 田秀秀, 等. 双镜面面形测量系统的全局优化标定方法[J]. 计测技术, 2025, 45(4): 57-65.

**Citation:** HE W J, NI Y B, TIAN X X, et al. Global optimized calibration method for double-specular-surface shape measurement system[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(4): 57-65.



tion method. When the initial system calibration method was used to obtain the system parameters, and then the complete 3D shape of a gauge block was reconstructed, the root mean square error ( $R_{\text{RMSE}}$ ) of the distance between the two surfaces of the gauge block was 164  $\mu\text{m}$ . When the global optimization system calibration method was employed to determine the system parameters and reconstruct the complete 3D shape of the gauge block, the  $R_{\text{RMSE}}$  for the distance between the two surfaces was reduced to 34  $\mu\text{m}$ . The global optimization system calibration method effectively improves the 3D shape measurement accuracy of double-specular-surface objects, providing a technical reference for enhancing the calibration precision of multi-sensor optical measurement systems under non-common-view conditions.

**Key words:** double-specular-surface; three-dimensional shape reconstruction; direct phase measuring deflectometry; system calibration; global optimization

## 0 引言

镜面物体在激光加工、半导体制造、航空航天以及汽车生产等领域均获得了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。直接相位偏折测量技术(Direct Phase Measuring Deflectometry, DPMD)以其非接触、速度快、精度高的优点,被广泛应用于非连续镜面物体的三维面形测量<sup>[3-5]</sup>。

在航天遥感分光系统、激光武器双反射腔等场景中存在许多双镜面类元件<sup>[6-8]</sup>,其两镜面法向量夹角大于 $90^\circ$ 甚至接近 $180^\circ$ ,可采用由2个无公共FoV的DPMD子系统组成的测量系统对双镜面面形进行拼接式测量。测量前,需完成双镜面面形测量系统中2个DPMD子系统的深度标定、横向标定以及2个子系统之间的基准统一标定,以上标定参数<sup>[9]</sup>的精度决定系统最后的测量精度。现有多视觉传感器系统大多依赖共视特征点约束来标定多个传感器之间的外参数,从而实现基准统一。而双镜面的法线夹角接近 $180^\circ$ ,双镜面面形测量系统中2个子系统无公共FoV,基准统一过程中会出现误差累积,影响标定精度。

REN H Y等人<sup>[10]</sup>提出一种迭代优化算法来提高立体相位偏折测量系统的标定精度,将电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机参数和CCD相机与液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)之间的几何关系合并为一个代价函数,通过平面参考镜将正弦条纹图案反射到2个CCD相机中,将参考镜的法向矢量作为该迭代优化算法的中间变量,优化所有标定参数,提高最终的重建精度。SONG L M等人<sup>[11]</sup>利用激光跟踪仪采样标

准球面面形,实现2个局部相机坐标系之间的全局标定,利用激光跟踪仪和相机测量特征圆柱体,得到特征点的测量误差函数,迭代目标函数优化激光跟踪仪和相机之间的坐标系转换参数,以提高大场景视觉测量系统的测量精度。HAN H等人<sup>[12]</sup>提出针对传统相位偏折测量系统的标定参数高精度优化方法,首先采用常规标定手段进行一次标定,然后采用精密方形平面反射镜对系统标定参数进行优化,将所有内外参数的标定视为一个全局多目标优化问题,所采用的优化方法直接在三维空间中实现,能够有效降低系统误差,提高系统测量精度。GAO Y Q等人<sup>[13]</sup>提出一种基于三维信息的系统参数优化方法。通过引入一个高精度的球面镜作为目标镜,将目标镜的重建残差作为成本函数,实现了相位偏折测量系统标定参数的优化。

现有的双镜面面形测量系统标定方法大多需要额外硬件辅助才能建立各子系统坐标系的变换关联,从而完成各子系统间的全局标定,增加了标定装置复杂度与标定结果的不稳定性。针对此问题,本文提出一种全局优化标定方法,以提高初始系统标定的精度。首先,采用传统方法进行子系统的深度标定与横向标定,利用双镜面标定板的尺寸参数进行子系统测量基准间标定;然后,采用高精度双镜面标定物来优化初始标定结果,引入3个度量误差以评估标定物的三维测量精度;之后,以系统标定参数为变量构造多目标优化函数,通过最小化定义的三维度量误差,计算得出最佳标定参数。

### 1 双镜面面形相位偏折测量原理

#### 1.1 数学模型

图1为双镜面面形测量系统。测量系统由两部分组成：左相机 $CCD_A$ 和左显示屏 $LCD_A$ 组成左相位偏折测量(Left DPMD, LDPMD)子系统，右相机 $CCD_B$ 和右显示屏 $LCD_B$ 组成右相位偏折测量(Right DPMD, RDPMD)子系统。LDPMD子系统覆盖被测双镜面物体左表面(Tested Surface A, TSA)的被测视角，RDPMD子系统覆盖被测双镜面物体右表面(Tested Surface B, TSB)的被测视角，两子系统没有公共测量视角。双镜面物体左表面TSA上点 $M$ 相对LDPMD子系统的参考平面(Reference Plane A, RPA)的高度为 $h_A$ ；双镜面物体右表面TSB上点 $N$ 相对RDPMD子系统的参考平面RPB的高度为 $h_B$ ；右表面TSB的点 $N$ 相对LDPMD子系统的参考平面RPA的高度为 $h_B^A$ 。

测量过程中，对于LDPMD系统， $LCD_A$ 需要移动2个位置，初始位置的 $LCD_A$ 记为 $LCD_{A1}$ ，移动位置的 $LCD_A$ 记为 $LCD_{A2}$ ，RPA与 $LCD_{A1}$ 的空间距离为

$d_A$ ， $LCD_{A1}$ 与 $LCD_{A2}$ 的空间距离为 $\Delta d_A$ 。 $CCD_A$ 图像靶面 $m$ 点的光线 $l_{A0}$ 分别与RPA和TSA交于点 $P$ 和点 $M$ ，光线 $l_{A0}$ 为RPA和TSA的出射光线。该出射光线所对应的2条入射光线分别为：经RPA反射的入射光线 $l_{A1}$ 和经TSA反射的入射光线 $l_{A2}$ 。光线 $l_{A1}$ 与 $LCD_{A1}$ 相交点的相位为 $\varphi_{Ar1}$ ，与 $LCD_{A2}$ 相交点的相位为 $\varphi_{Am1}$ ，与RPA上 $P$ 点法线的夹角为 $\theta_A$ 。TSA的点 $M$ 处法线和RPA的法线夹角为 $\gamma_A$ 。光线 $l_{A2}$ 与 $LCD_{A1}$ 相交点的相位为 $\varphi_{Ar2}$ ，与 $LCD_{A2}$ 相交点的相位为 $\varphi_{Am2}$ ，与RPA上 $P$ 点法线的夹角为 $(\theta_A + 2\gamma_A)$ 。 $\varphi_{Ar1}$ 与 $\varphi_{Am1}$ 之间的空间距离为 $\Delta L_A$ 。TSA上点 $M$ 相对RPA的高度为 $h_A$ 。根据文献[14]，结合图1的LDPMD子系统中光线传播的几何关系，可知： $h_A$ 与绝对相位间的关系为

$$h_A = \frac{d_A [(\varphi_{Am1} - \varphi_{Am2}) - (\varphi_{Ar1} - \varphi_{Ar2})] - \Delta d_A (\varphi_{Ar1} - \varphi_{Am1})}{(\varphi_{Am1} - \varphi_{Am2}) + (\varphi_{Ar1} - \varphi_{Ar2})} \quad (1)$$

对于RDPMD系统， $LCD_B$ 需要移动2个位置，初始位置的 $LCD_B$ 记为 $LCD_{B1}$ ，移动位置的 $LCD_B$ 记为 $LCD_{B2}$ ，LDPMD系统的参考平面(Reference Plane

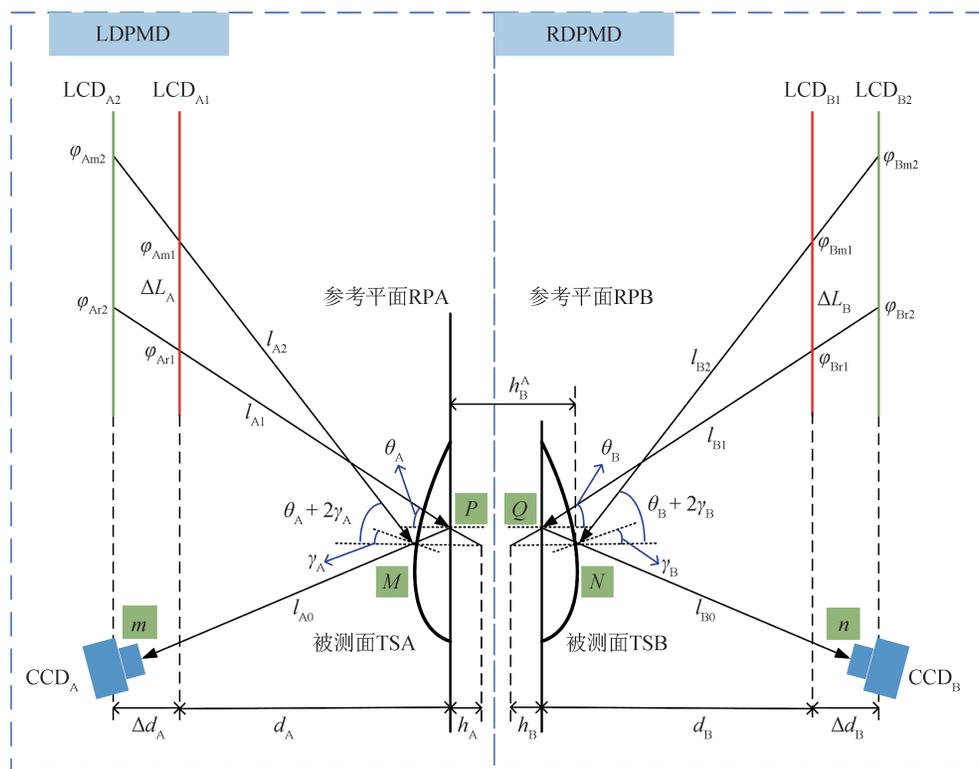


图1 双镜面面形测量系统

Fig.1 Measurement system for 3D shape of double-specular-surface objects

B, RPB)与LCD<sub>B1</sub>的空间距离为 $d_B$ , LCD<sub>B1</sub>与LCD<sub>B2</sub>的空间距离为 $\Delta d_B$ 。CCD<sub>B</sub>图像靶面 $n$ 点的光线 $l_{B0}$ 分别与RPB和TSB交于点 $Q$ 和点 $N$ , 光线 $l_{B0}$ 为RPB和TSB的出射光线。该出射光线所对应的两条入射光线分别为: 经RPB反射的入射光线 $l_{B1}$ 和经TSB反射的入射光线 $l_{B2}$ 。光线 $l_{B1}$ 与LCD<sub>B1</sub>相交点的相位为 $\varphi_{Br1}$ , 与LCD<sub>B2</sub>相交点的相位为 $\varphi_{Br2}$ , 与RPB上 $Q$ 点法线的夹角为 $\theta_B$ 。TSA的点 $N$ 处法线和RPB的法线夹角为 $\gamma_B$ 。光线 $l_{B2}$ 与LCD<sub>B1</sub>相交点的相位为 $\varphi_{Bm1}$ , 与LCD<sub>B2</sub>相交点的相位为 $\varphi_{Bm2}$ , 与RPB上 $Q$ 点法线的夹角为 $(\theta_B + 2\gamma_B)$ 。  $\varphi_{Br1}$ 与 $\varphi_{Bm1}$ 之间的空间距离为 $\Delta L_B$ 。TSB上点 $N$ 相对RPB的高度为 $h_B$ 。结合图1的RDPMD子系统中光线传播的几何关系, 可知:  $h_B$ 与绝对相位间的关系为

$$h_B = \frac{d_B [(\varphi_{Bm1} - \varphi_{Bm2}) - (\varphi_{Br1} - \varphi_{Br2})] - \Delta d_B (\varphi_{Br1} - \varphi_{Bm1})}{(\varphi_{Bm1} - \varphi_{Bm2}) + (\varphi_{Br1} - \varphi_{Br2})} \quad (2)$$

## 1.2 初始系统标定

### 1.2.1 子系统标定

LDPMD子系统和RDPMD子系统均属于DPMD系统。采用DPMD系统测量镜面面形时, 通过深度标定确定一个参考平面, 这个参考平面一般与标定所用标定板的反射面重合, 被测镜面的高度以此参考平面为基准。通过横向标定确定一个参考平面坐标系, 此坐标系中, 一般以标定板表面的特征点为坐标原点, 被测镜面的三维坐标位于此坐标系下, 该参考平面坐标系即DPMD系统的测量基准。如图2所示, 标定所用双镜面标定板具有2个法线夹角为 $180^\circ$ 的反射面。每个表面居中设置 $9 \times 12$ 个相同大小的黑色圆环, 相邻圆环的行距和列距均为 $15 \text{ mm}$ , 采用丝印方式使得2个表面圆环阵列中的每个圆环均完全独立贴合标定板表面。双镜面标定板采用2片高精度单镜面标定板胶合而成, 双镜面间距离为 $6 \text{ mm}$ , 误差不超过 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 。用此双镜面标定板的一个反射面对LDPMD子系统进行深度标定与横向标定, 用另一个反射面对RDPMD子系统进行深度标定与横向标定。因此, 2个子系统的参考平面坐标系(即测量基准)分别以标定板2个反射面上特定圆环圆心(特征点)为坐标原点。

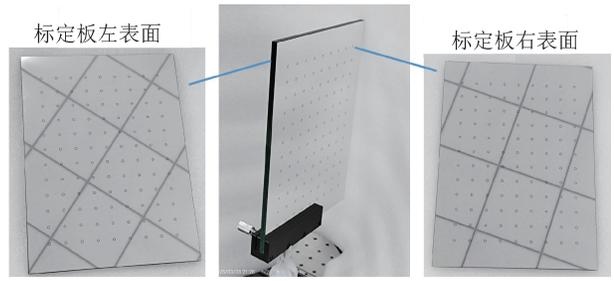


图2 双镜面标定板

Fig.2 Double-specular-surface calibration plate

采用文献[14]中的方法进行2个DPMD子系统的深度标定, 得到 $d_A$ 、 $\Delta d_A$ 、 $d_B$ 、 $\Delta d_B$ ; 利用双镜面标定板对2个DPMD子系统同时进行横向标定, 从而确定相机每个像素点所对应不同深度点的空间 $X$ 、 $Y$ 坐标。通过深度标定与横向标定, 定义了LDPMD子系统的测量基准(即坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$ )和RDPMD子系统的测量基准(即坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ )。2个坐标系的空间位置关系如图3所示, 两坐标系的 $XOY$ 平面分别与标定板的2个表面重合, 两坐标系的坐标原点分别位于标定板的2个表面的特征点处。

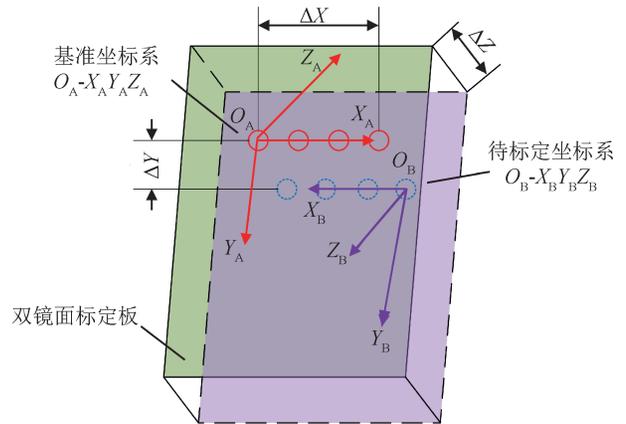


图3 坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 与 $O_B-X_B Y_B Z_B$ 间的位置关系

Fig.3 Location relationship between coordinate system

$O_A-X_A Y_A Z_A$  and  $O_B-X_B Y_B Z_B$

结合两子系统的深度标定与横向标定数据, 可得到位于坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 下被测物左表面TSA的三维面形数据 $(X_A, Y_A, Z_A)$ , 以及位于坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ 下被测物右表面TSB的三维面形数据 $(X_B, Y_B, Z_B)$ 。

### 1.2.2 子系统测量基准间标定

双镜面标定板的两个反射面稳定地刚性连接，两反射面上特征点之间具有确定的位置关系。因此，两个子系统测量基准间具有确定的刚性变换关联(即借助双镜面标定板对两个子系统的测量基准建立了刚性变换关联)。求出表示此刚性变换关联的变换矩阵，即可完成两子系统测量基准间标定，实现两子系统测量基准的统一。

将LDPMD子系统的测量基准 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 定义为双镜面面形测量系统的基准坐标系，将RDPMD子系统的测量基准 $O_B-X_B Y_B Z_B$ 定义为双镜面面形测量系统的待标定坐标系。式(3)表示了基准坐标系与待标定坐标系间的刚性变换关联，利用式(3)可将空间中一点 $S$ 在待标定坐标系下的齐次坐标 $S_B$ 转换为在基准坐标系下的齐次坐标 $S_B^A$ 。因此，只要得到变换矩阵 ${}^A_B M$ ，即可实现两子系统测量基准统一，从而将两子系统所得的两组面形数据自动匹配，得到双镜面物体的整体三维面形。

$$S_B^A = {}^A_B M \times S_B \quad (3)$$

采用双镜面标定板标定变换矩阵 ${}^A_B M$ 。根据标定板的厚度、两表面选定区域圆环阵列的圆环数量和圆心距，可计算图3中坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 和坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ 的坐标原点之间的空间距离 $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$ ，从而计算两坐标系之间的平移矩阵。根据两坐标系的定义方法可知：两坐标系的 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴之间夹角均为 $0^\circ$ 。在此基础上，可计算两坐标系之间的旋转矩阵。利用刚体变换<sup>[15]</sup>方法，基于旋转矩阵与平移矩阵计算变换矩阵 ${}^A_B M$ 。但是，由于标定板制造过程存在误差，标定板2个表面不严格平行，标定板的标称厚度与实际厚度之间存在误差，为降低该误差对测量结果的影响，本文提出全局优化系统标定方法。

## 2 全局优化系统标定

将双镜面面形测量系统的参数标定视为全局优化问题。将子系统标定与子系统测量基准间的标定结果作为初始标定参数，基于高精度双镜面标定物优化初始参数，引入3个度量误差来评估标定物的三维测量精度，构造多目标优化函数，通过最小化所定义的三维度量误差，得到测量系统

的最佳标定参数。

如图4所示，基于双镜面正方形反射镜的三维重建信息，提取反射镜8个角点在基准坐标系下的三维坐标，计算图中侧面的4条边的长度 $d_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )、侧面的8条面对角线长度 $d_j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, 8$ )、4条体对角线长度 $d_k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ )。定义3个度量误差，即反射镜侧面的边长距离误差 $E_{d1}$ 、侧面的面对角线距离误差 $E_{d2}$ 、体对角线距离误差 $E_{d3}$ ，构建并求解非线性多目标优化问题，以最小化3个度量误差，从而得到测量系统的最佳标定参数。标定参数全局优化流程如图5所示。

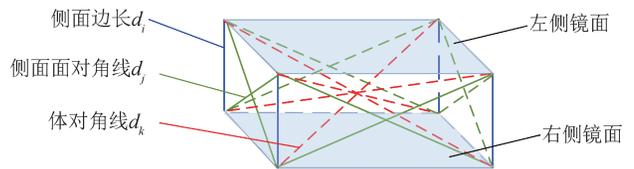


图4 采用正方形反射镜全局优化示意图

Fig.4 Schematic of global optimization using square reflector

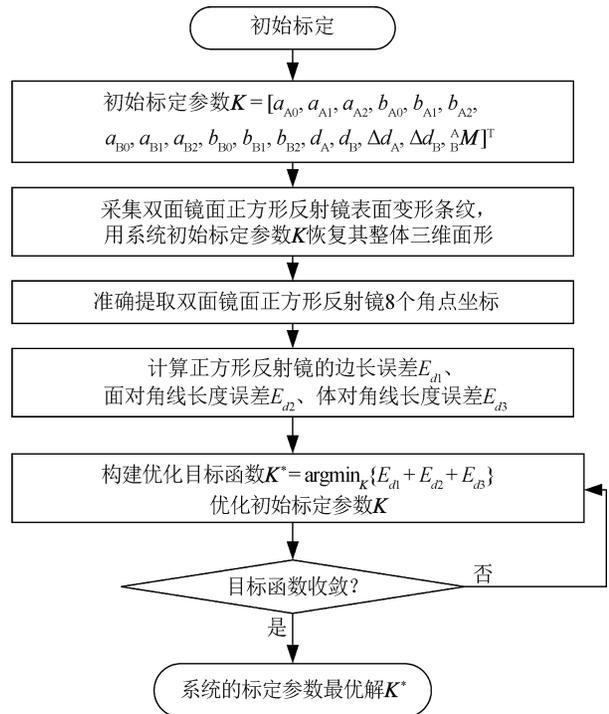


图5 标定参数全局优化流程图

Fig.5 Global optimization process for calibration parameters

采用的3个目标函数定义为

$$E_{d1} = \frac{\sum_{i=1}^4 |d_i - L_1|}{4}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

$$E_{d2} = \frac{\sum_{j=1}^8 |d_j - L_2|}{8}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, 8 \quad (5)$$

$$E_{d3} = \frac{\sum_{k=1}^4 |d_k - L_3|}{4}, \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

式中： $L_1$ 为标定物侧面边长真实值， $L_2$ 为标定物侧面对角线真实值， $L_3$ 为标定物的体对角线真实值。

系统中需要优化的参数包括：深度标定参数  $d_A$ 、 $\Delta d_A$ 、 $d_B$ 、 $\Delta d_B$ ，横向标定参数  $a_{A0}$ 、 $a_{A1}$ 、 $a_{A2}$ 、 $b_{A0}$ 、 $b_{A1}$ 、 $b_{A2}$ 、 $a_{B0}$ 、 $a_{B1}$ 、 $a_{B2}$ 、 $b_{B0}$ 、 $b_{B1}$ 、 $b_{B2}$ 和子系统测量基准间标定参数 ${}^A_B \mathbf{M}$ ，用矢量 $\mathbf{K}$ 表示为

$$\mathbf{K} = [a_{A0}, a_{A1}, a_{A2}, b_{A0}, b_{A1}, b_{A2}, a_{B0}, a_{B1}, a_{B2}, b_{B0}, b_{B1}, b_{B2}, d_A, d_B, \Delta d_A, \Delta d_B, {}^A_B \mathbf{M}]^T \quad (7)$$

构建优化目标函数，得到双镜面面形测量系统的最佳标定参数 $\mathbf{K}^*$ ，公式为

$$\mathbf{K}^* = \arg \min_{\mathbf{K}} (E_{d1} + E_{d2} + E_{d3}) \quad (8)$$

对 $E_{d1}$ 、 $E_{d2}$ 、 $E_{d3}$ 赋予相同的权重，以求解最佳标定参数。这种等权重的方法可以确保各误差项在优化过程中具有相同的重要性，从而提高整体标定精度和可靠性。

为求得优化目标函数的最优解，可使用的非线性优化方法包括梯度下降法、牛顿法、高斯牛顿法和LM(Levenberg Marquardt)算法。LM算法是结合了梯度下降法与高斯牛顿法优点的一种混合方法，通过引入一个控制参数 $\lambda$ 来动态调整每一步迭代的方向和步长，具有更好的稳定性和鲁棒性。因此，本文采用LM算法求解最佳标定参数。

### 3 实验及结果分析

为验证所提全局优化系统标定方法的有效性 with 精度，搭建如图6所示的实验系统。该系统由2台CCD相机、2个LCD显示屏、3个高精度水平移动导轨和1台计算机组成。CCD相机型号为MER2-501-79U3M，分辨力为2 448 pixels  $\times$  2 048 pixels，像元尺寸为3.45  $\mu\text{m}$   $\times$  3.45  $\mu\text{m}$ ，CCD相机镜头焦距为16 mm；LCD显示屏型号为G1316，分辨力为1 920 pixels  $\times$  1 080 pixels，单像素物理尺寸为153.16  $\mu\text{m}$   $\times$  153.70  $\mu\text{m}$ ；高精度水平移动导轨型

号为GCD203300M，总行程为300 mm，重复定位误差不超过5  $\mu\text{m}$ ，符合实验系统的定位精度要求；镜面标定板表面圆环阵列的圆环圆心距为15 mm。

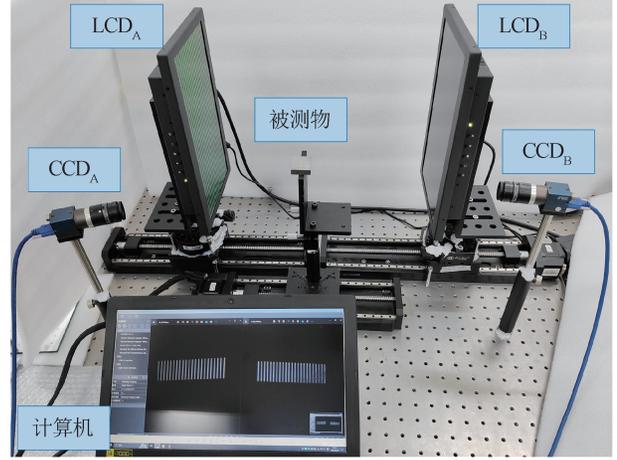


图6 实验系统

Fig.6 Experimental system

#### 3.1 全局优化系统标定结果

双镜面标定板厚度为6 mm，标定板两表面圆环数量均为9  $\times$  12，相邻圆环的行距和列距均为15 mm。可知所定义坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 与坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ 的原点在空间 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向的距离，利用刚体变换方法计算坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 与坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ 间的变换矩阵为 ${}^A_B \mathbf{M}_1$ ，即

$${}^A_B \mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} -1.0000 & 0 & 0 & 60.0000 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.0000 & 6.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (9)$$

采用全局优化系统标定方法对双镜面面形测量系统的初始系统标定参数进行优化。正方形反射镜如图7所示，其表面平面度误差小于63.3 nm，两镜面平行度误差小于0.05°。

基于初始标定参数，利用所搭建的实验系统测量此双镜面正方形反射镜三维面形。双镜面正方形反射镜在双镜面面形测量系统的基准坐标系下的整体三维面形如图8所示，提取正方形反射镜的8个角点 $A_1 \sim A_8$ 在基准坐标系下的三维坐标。计算 $d_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )、 $d_j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, 8$ )、 $d_k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ )、 $E_{d1}$ 、 $E_{d2}$ 、 $E_{d3}$ ，构建非线性多目标优化函数以最小化3个度量误差。进行全局优化时，将式(8)中函数收敛的阈值设置为50  $\mu\text{m}$ ，

以确保算法能够在合理的时间内收敛，同时保证较高的测量精度。最后，基于LM算法采用MATLAB优化工具箱，得到测量系统的最佳标定参数 $K^*$ 。坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 与坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ 间的变换矩阵优化结果为 ${}^A_B M_2$ ，即

$${}^A_B M_2 = \begin{bmatrix} -0.9436 & -0.0092 & -0.0166 & 59.9951 \\ 0.0408 & 0.9994 & -0.1400 & 0.0010 \\ -0.0151 & -0.0074 & -0.9923 & 5.9998 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (10)$$

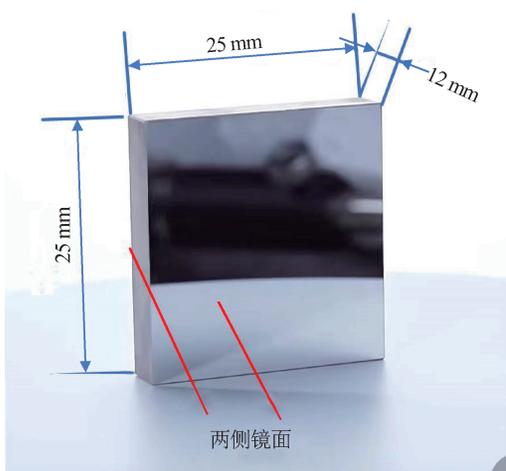


图7 正方形反射镜实物图  
Fig.7 Appearance of square reflector

### 3.2 标定精度实验验证

使用具有2个镜面表面的高精度量块作为被测双镜面物体，其尺寸为35 mm×9 mm×30 mm，误差不超过±0.5 μm。图9(a)为量块实物图；图9(b)为量块左表面在基准坐标系下的三维面形图；图9(c)

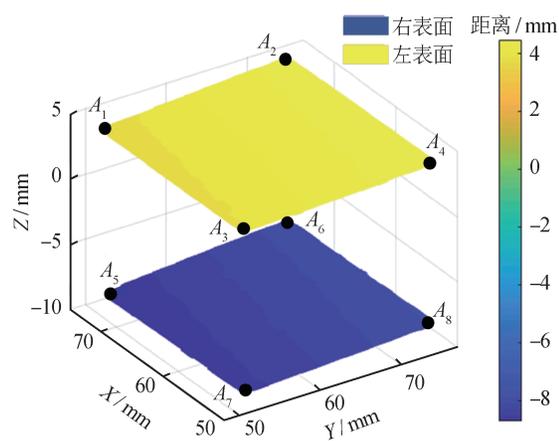
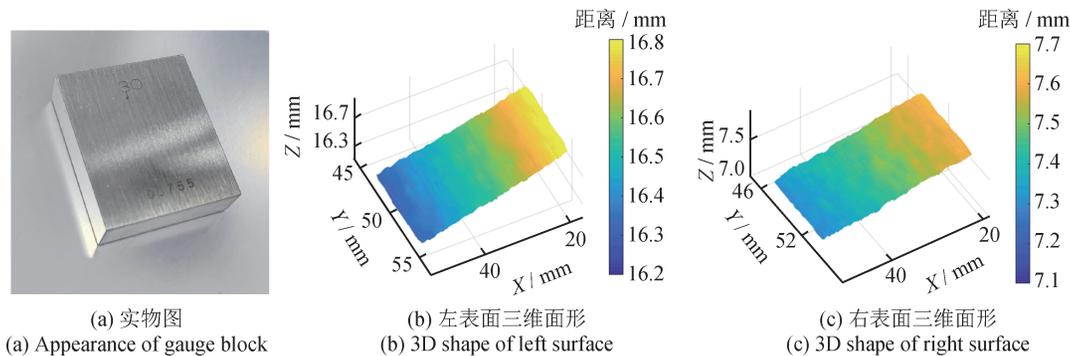


图8 基准坐标系下正方形反射镜三维面形  
Fig.8 3D shape of the square reflector in base coordinate system

为量块右表面在待标定坐标系下的三维面形图。

为验证所提全局优化系统标定方法的精度，分别对利用初始系统标定参数与全局优化系统标定参数计算所得量块两表面间距离误差进行对比。图10为利用双镜面标定板的尺寸参数进行初始系统标定所得测量结果，其中，图10(a)为位于基准坐标系下的量块整体三维面形图；通过计算量块右表面的每一点到量块左表面所有点所拟合平面的距离，得到量块两表面间测量距离与真实距离间的误差，如图10(b)所示；图10(c)为误差在图像像素坐标系第835行的剖面图。图11为采用全局优化系统标定方法所得测量结果，其中，图11(a)为位于基准坐标系下的量块整体三维面形图；图11(b)为量块两表面间的测量距离与真实距离间的误差；图11(c)为误差在图像像素坐标系第835行的剖面图。



(a) 实物图  
(a) Appearance of gauge block

(b) 左表面三维面形  
(b) 3D shape of left surface

(c) 右表面三维面形  
(c) 3D shape of right surface

图9 量块实验结果

Fig.9 Experimental results of gauge block measurement

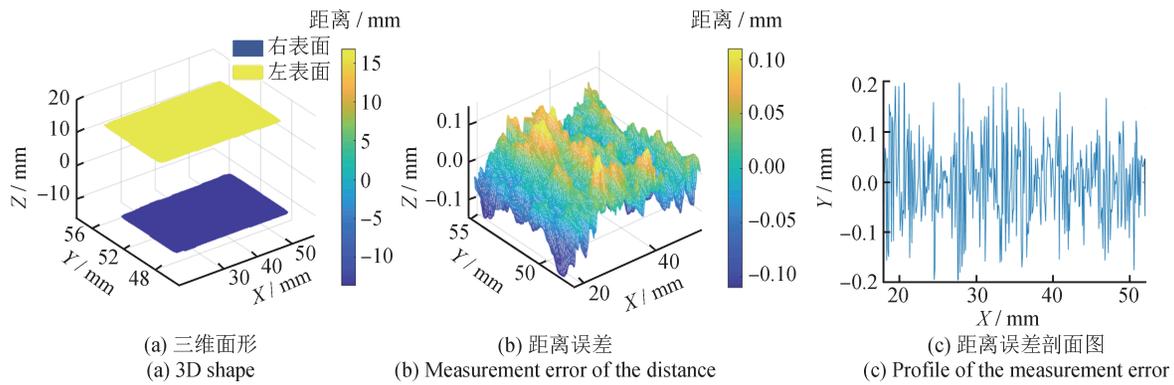


图10 采用初始系统标定方法所得结果

Fig.10 Experimental results obtained using the initial system calibration method

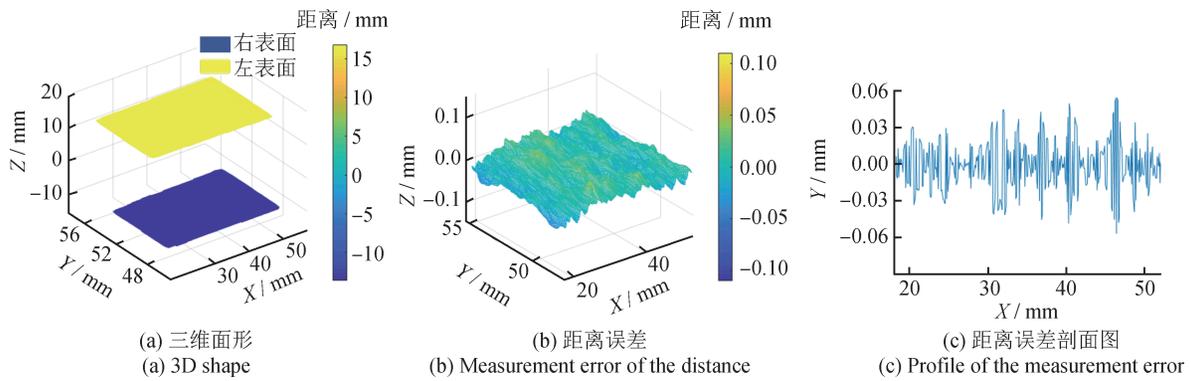


图11 采用全局优化系统标定方法所得结果

Fig.11 Experimental results obtained using the global optimization system calibration method

利用初始系统标定方法得到测量系统参数，然后重建量块的整体三维面形，得到量块两表面间距离的 $R_{RMSE}$ 为 $164\ \mu\text{m}$ ；利用全局优化系统标定方法得到测量系统参数，然后重建量块的整体三维面形，得到量块两表面间距离的 $R_{RMSE}$ 为 $34\ \mu\text{m}$ 。根据测量结果可知：本文所提出的全局优化系统标定方法可有效提升双镜面物体三维面形的测量精度。

#### 4 结论

针对双镜面物体完整三维面形测量领域中存在的系统标定精度低的问题，提出了一种全局优化标定方法。建立了由2个无公共FoV的DPMD子系统组成的双镜面面形测量系统，实现对双镜面物体被测视角的完整覆盖。在初始标定基础上，引入基于双镜面正方形反射镜角点信息构建的3个度量误差函数，构建非线性多目标优化问题，并采用LM算法对系统参数进行全局优化。实验结果

表明：利用全局优化系统标定方法得到测量系统参数，然后重建量块的整体三维面形，得到量块两表面间距离的 $R_{RMSE}$ 为 $34\ \mu\text{m}$ ，显著提升了系统的测量精度。该方法为非共视条件下多传感器光学测量系统的标定提供了新思路，具有良好的工程应用前景。

#### 参考文献

- [1] 张宗华, 刘巍, 刘国栋, 等. 三维视觉测量技术及应用进展[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(6): 1483-1502.
- ZHANG Z H, LIU W, LIU G D, et al. Overview of the development and application of 3D vision measurement technology[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(6): 1483-1502. (in Chinese)
- [2] ZHANG X J, HU H X, WANG X K, et al. Challenges and strategies in high - accuracy manufacturing of the world's largest SiC aspheric mirror[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 2873-2885.
- [3] LIU J Y, REN M J, GAO F, et al. On-machine calibra-

- tion method for in situ stereo deflectometry system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1–8.
- [4] ZHANG Z H, CHANG C X, LIU X H, et al. Phase measuring deflectometry for obtaining 3D shape of specular surface: a review of the state-of-the-art[J]. Optical Engineering, 2021, 60(2): 020903.
- [5] 王月敏, 张宗华, 高楠. 基于全场条纹反射的镜面物体三维面形测量综述[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1014–1027.  
WANG Y M, ZHANG Z H, GAO N. Review on three-dimensional surface measurements of specular objects based on full-field fringe reflection[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(5): 1014–1027. (in Chinese)
- [6] WANG D D, XU P, WU Z D, et al. Simultaneous multi-surface measurement of freeform refractive optics based on computer-aided deflectometry[J]. Optica, 2020, 7(9): 1056–1064.
- [7] YAO J N, ANDERSON A, ROLLAND J P. Point-cloud noncontact metrology of freeform optical surfaces[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10242–10265.
- [8] ZHANG L, ZHOU S, LI D, et al. Pure adaptive interferometer for free form surfaces metrology[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 7888–7898.
- [9] XU Y J, GAO F, ZHANG Z H, et al. A calibration method for non-overlapping cameras based on mirrored absolute phase target[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104: 9–15.
- [10] REN H Y, GAO F, JIANG X Q. Iterative optimization calibration method for stereo deflectometry[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22060–22068.
- [11] SONG L M, WANG R H, CHEN E, et al. Research on global calibration method of large-scene multi-vision sensors in wheel alignment [J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(11): 115001.
- [12] HAN H, WU S Q, SONG Z. An accurate calibration means for the phase measuring deflectometry system [J]. Sensors, 2019, 19(24): 5377.
- [13] GAO Y Q, TIAN Z Y, WEI H Y, et al. 3D global optimization of calibration parameters of deflectometry system by using a spherical mirror[J]. Measurement, 2023, 219: 113287.
- [14] CHANG C X, SHI Y Q, LIU X H, et al. System calibration method for infrared phase measuring deflectometry [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108178.
- [15] LAVALLE S M. Planning algorithms [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

(本文编辑: 刘圣晨)



**第一作者:** 何雯静(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为多维光视精密测量原理、方法及系统。



**通信作者:** 张宗华(1974—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析、三维标定。荣获欧盟玛丽·居里学者、教育部新世纪优秀人才、天津市劳动模范、河北省“三三三人才工程”一层次人选、河北省杰出专业技术人才、河北省政府特殊津贴专家、首批天津市“中青年科技创新领军人才”、江苏省双创人才等人才称号。发表论文290余篇, 作为第一完成人, 获得中国专利优秀奖、河北省技术发明一等奖、天津市专利奖金奖、中国光学工程学会技术发明一等奖等。