

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514743

基于区域多模态柔性映射的光切片平面标定*

陈晓辉^{1,2}, 骆晓文¹, 王生怀¹, 王宸^{1,2}, 钟毓宁^{1,3}

(1. 湖北汽车工业学院汽车智能制造学院 十堰 442002; 2. 电池关键材料绿色智能制造技术湖北省重点实验室 十堰 442002; 3. 湖北开放大学 武汉 430074)

摘要:针对现有光切片三维重建系统中光平面标定步骤繁琐、标定精度低等问题,提出了一种基于区域多模态柔性映射的光切片平面标定方法。该方法基于棋盘格图像内角点坐标作为光平面标定计算控制点,将标定过程中光平面方程求解问题转化成像素和世界坐标系中控制点之间的映射问题。基于此,构建区域多模态柔性映射模型,实现光平面上各区域中特征点在像素与世界坐标之间的柔性映射,解决了因畸变导致的标定精度损失的问题,同时考虑了非正交畸变与高阶非线性变形的影响。该方法仅需一次整体柔性映射,在完成畸变矫正的同时,实现光平面的高精度标定。该方法无需计算光条中心点,无需内外参数矩阵参与计算,从而避免了图像算法误差对标定结果的影响。实验结果表明,该方法操作简单,特征点较多,标定前后对应特征点之间的平均距离残差为 0.01 μm ,与不同阶数映射模型进行对比,映射精度提升一个数量级;标定后的测量系统经过多组 800 次重复性测量,标准差在 0.1 μm 左右,重复性测量精度在 8 μm 以内,均方根误差为 6.5 μm ;相较于传统的交比不变法,该方法的测量精度提升了 83.26%。搭建了光切片三维重建平台,并确定该光切片重建系统的平面与深度适用范围,对深度范围测量精度进行了验证,满足光切片三维测量的稳定可靠、精度高等要求。

关键词: 多模态;光切片;柔性映射;光平面标定;三维重建

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Calibration of sheet-of-light plane based on regional multi-modal flexible mapping

Chen Xiaohui^{1,2}, Luo Xiaowen¹, Wang Shenghuai¹, Wang Chen^{1,2}, Zhong Yuning^{1,3}

(1. Hubei University of Automotive Technology of Automotive Intelligent Manufacturing, Shiyan 442002, China;
2. Hubei Key Laboratory of Green Intelligent Manufacturing Technologies of Battery Key Materials, Shiyan 442002, China;
3. Hubei Open University, Wuhan 430074, China)

Abstract: To overcome the limitations of complex calibration procedures and low accuracy in light-plane calibration for existing sheet-of-light 3D reconstruction systems, a regional multimodal flexible mapping-based light-plane calibration method is proposed. The proposed method uses the inner corner coordinates of a checkerboard image as control points for light-plane calibration, transforming the problem of solving the light-plane equation during calibration into a mapping problem between control points in the pixel and world coordinate systems. Based on this, a regional multimodal flexible mapping model is constructed to achieve flexible mappings between pixel and world coordinates for feature points in different regions of the light plane. This approach addresses the loss of calibration accuracy caused by distortions, while accounting for non-orthogonal distortions and high-order nonlinear deformations. The method requires only a single comprehensive flexible mapping, achieving both distortion correction and high precision calibration of the optical plane. The method obviates the need for light stripe center calculation and the utilization of intrinsic and extrinsic parameter matrices, thereby eliminating the impact of image-processing errors on calibration outcomes. Experimental results demonstrate that the proposed method is simple to operate and supports a large number of feature points. The average distance residual between corresponding feature points before and after calibration is 0.01 μm . Compared with mapping models of different orders, the mapping accuracy is improved by an order of magnitude. After calibration, the measurement system exhibits a standard deviation of approximately 0.1 μm over multiple sets of 800

收稿日期: 2025-12-01 Received Date: 2025-12-01

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52475557)、湖北汽车工业学院博士科研启动基金项目(BK202328)资助

repeated measurements, with repeatability accuracy within $8\ \mu\text{m}$ and a root mean square error of $6.5\ \mu\text{m}$. Compared with traditional invariance of cross-ratio methods, the proposed method improves measurement accuracy by 83.26%. A sheet-of-light 3D reconstruction platform was established. The planar and depth ranges of the system were characterized, and the measurement accuracy in the depth direction was experimentally validated. It fundamentally meets the requirements for stable, reliable, and high-precision sheet-of-light 3D reconstruction systems.

Keywords: multimodal; sheet-of-light; flexible mapping; light plane calibration; 3D reconstruction

0 引言

光切片三维重建技术是一种基于激光三角测量原理^[1]的主动视觉测量技术。得益于光切片高亮度、高相干性和良好的指向性,因此不受物体的纹理、外观、颜色或其他表面特性的影响,具有较高的鲁棒性。该技术已广泛应用于工业机器人^[2]、生物医学工程^[3]、精密工业产品检测^[4]、海洋工程^[5]等领域。

光切片三维重建技术依赖于高精度的光平面标定。在成像系统采集到具有能表征被测物体表面形貌的光切片轮廓后,对轮廓条纹中心进行提取^[6],采用标定算法^[7]解算成像面轮廓中心线对应的物理坐标,进一步,沿着光切片平面法向平移驱动,获得一系列轮廓信息,通过标定扫描方向^[8]最终实现高精度三维重建。因此,光学平面的标定是光切片三维重建系统的重要组成部分,直接影响整体系统重建精度与可靠性。

光平面标定通常分为两个部分:成像系统的标定和光平面的标定。成像系统的标定主要估计相机的内、外参数矩阵以及镜头畸变系数,其中张氏相机标定法^[9]是最广泛采用的方法之一。光平面的标定一般通过提取多组位姿下投射到标靶上的光条纹中心线,基于相机标定获得的内、外参数以及畸变系数,解算出相机坐标系中的光学平面方程^[10-11]。

目前,常用的光平面标定方法中,向量叉积法^[12]操作简单,但由于无法精确提取亮光条纹的交点,精度有限;而线性方程组法^[13]和交叉比不变法^[14]精度较高,因此被广泛采用。Zhou等^[14]提出了一种基于交叉比不变性的平面标靶标定方法,可在未知姿态下生成大量非共线的光平面控制点,以提高标定精度,该方法测量的均方根误差(root mean square error, RMSE)为 $0.085\ \text{mm}$,但控制点密度受平面纹理影响。针对目标控制点和条纹中心点的位置不确定性,Pan等^[15]提出采用非线性多步优化来计算每个点的位置偏差,从而补偿了这种不确定性,优化了采用平面标靶标定时受制于特征点定位精度的局限性。Bok等^[16]提出了一种使用平面方格网的光学平面标定方法,通过标靶板中的控制点和光条纹的中心线进行标定,光学平面方程使用多个图像的特征点进行拟合。然而,在提取光条纹中心和计算内角点时易产生计算误

差。特别是在提取多组中心线来拟合光学平面方程时,重复提取产生的累积误差会降低拟合光学平面方程的精度。为了提高光学平面方程拟合的精度,Liu等^[17]建立了结构光传感器的系统误差模型。他们得出了由不准确的光学平面方程引起的系统误差的分布函数,并对距离误差和方向误差进行了两步校正,将系统误差减少了80%以上。陈天飞等^[18]提出了通过控制传感器做若干平移运动分两步完成标定的方法,该方法无需对光平面进行拟合,且操作方便无需标靶,但标定精度受限于传感器的位移精度,且仍需对相机进行标定。综上所述,大多数现有的光切片视觉测量系统中的光平面标定都需要依赖于成像系统的内外参数矩阵以及畸变参数的计算,基于此,计算光切片的结构参数,因此标定过程十分繁琐且计算量大。此外,标定方法过程中光条纹中心线提取的精度会直接影响光切片平面结构参数的精度。虽然使用优化算法和改进的标靶目标可以提高光平面的结构参数精度,但仍不足以满足精密制造行业对微米级高精度测量的严格要求。

针对上述问题,提出了一种基于区域多模态柔性映射的光切片三维重建系统光平面标定方法。该方法基于棋盘格图像内角点坐标作为光平面标定计算控制点,将标定过程中光平面方程求解问题转化成像素和世界坐标系中控制点之间的映射问题。因此,该方法无需计算光条中心点,无需内外参数矩阵参与计算,从而避免了图像算法误差对标定结果的影响。构建区域多模态柔性映射模型,在各区域特征点的像素坐标和世界坐标之间建立映射关系。该方法仅需一次整体柔性映射,在完成精细化畸变矫正的同时,实现光平面的高精度标定,简化了标定过程,同时提高了光平面标定的精度与鲁棒性。

1 基本原理

1.1 测量原理

光切片三维测量原理如图1所示。测量使用曲面工件作为测量目标,光片发射器投射出一个光平面 γ ,在被测物体表面产生一条光条纹轮廓,电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机同时捕获到该光条纹。将世界坐标系定义为 $O_w - X_w Y_w Z_w$,点 $Q_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 表示光条纹中心的一点,在世界坐标系中表示为 $Q_i(x, y, z)$ 。

在像素坐标系 $O-uv$ 中, 将图像平面的左上角被定义为原点, 水平向右为 u 轴, 垂直向下为 v 轴。点 $P_i(u, v)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 表示光条纹中心点在像素坐标系中的坐标。显然, 点 P_i 和 Q_i 之间存在一一对应的关系。光切片三维测量系统中光平面标定的本质在于建立像素坐标系 $O-uv$ 中的点 $P_i(u, v)$ 与世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 中的点 $Q_i(x, y, z)$ 之间的映射关系, 是实现测量系统中的高精度测量的重要步骤。

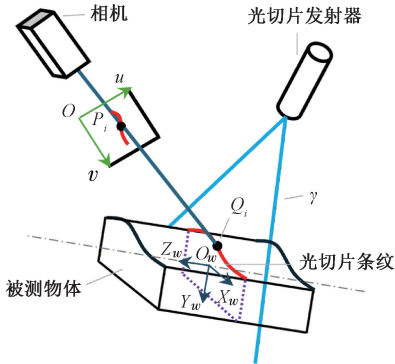


图 1 光切片三维测量系统原理

Fig. 1 Diagram of the sheet-of-light 3D measurement system

1.2 光平面的标定原理

将光平面与二维平面标靶对齐重合, 通过使用面阵 CCD 相机捕获二维平面标靶图案, 在图像平面的像素坐标系 $O-uv$ 中获得光平面的关键特征点, 如图 2 所示。

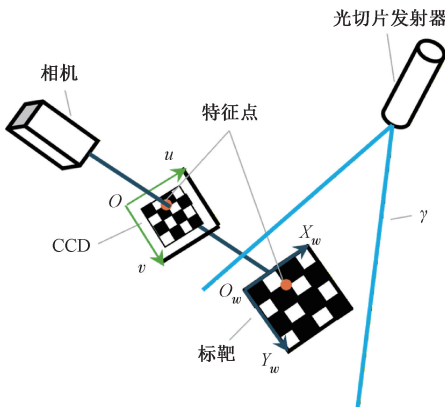


图 2 光平面标定示意图

Fig. 2 Diagram of light plane calibration

世界坐标系放置于二维平面标靶上, 将 $Z_w = 0$ 平面与二维平面标靶平面重合, Z_w 轴平行于标靶平面的法向量 \vec{n} , 从而确定光平面在世界坐标系 $O_w-X_wY_w$ 中的关键特征点, 将标定过程中光平面方程求解问题转化成像素和世界坐标系中控制点之间的映射问题。通过上述步骤, 可以实现物理空间中三维点的降维, 实现平面之间

二维点的映射。因此, 光平面标定的过程可以转化为求解像素坐标控制点 $P_i(u, v)$ 世界坐标控制点 $Q_i(x, y)$ 之间的映射关系。

光学失真普遍存在于光学成像系统中, 它不同于球差等导致成像模糊的像差, 主要影响图像的几何形态, 且其影响程度随图像平面位置而变化。这导致在图像识别、尺寸检测与位移测量以及三维重建过程中产生错误^[19]。因此需要对失真进行矫正, 尤其是在高精度测量领域。将成像平面划分为若干区域, 并构建区域多模态柔性映射模型, 在形变的成像平面 $O-uv$ 上的各个区域和与之对应的光平面区域之间建立柔性映射关系 W , 实现光平面的高精度标定。

将点 Q_{ij} 定义为位于棋盘格校准板第 i 列和第 j 行的内角点, 而点 P_{ij} 则代表图像平面上相应的内角点。由于点 Q_{ij} 和点 P_{ij} 之间存在一一对应的关系, 可以形成多组特征点组。为便于分析, 将光平面世界坐标系 $O_w-X_wY_w$ 中的特征点 Q_{00} 定义为原点。水平向右为 X 轴正方向, 垂直向下为 Y 轴正方向, 如图 3 所示。

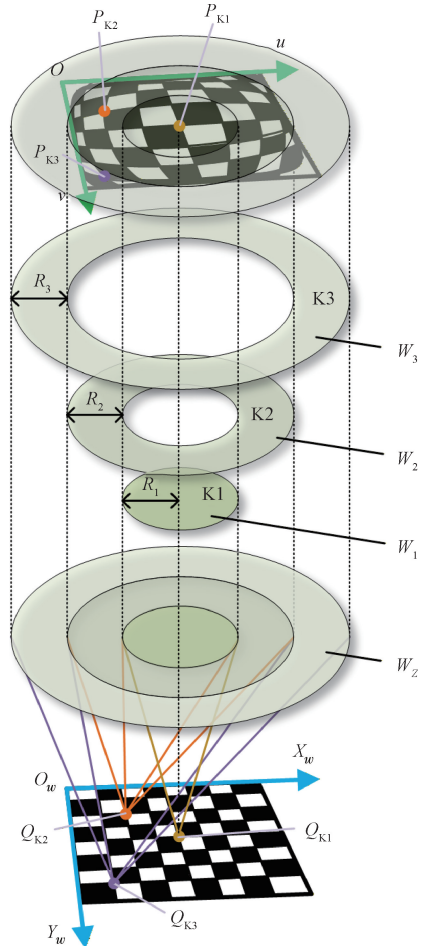


图 3 区域多模态柔性映射模型

Fig. 3 Regional multimodal flexible mapping model

在光平面上选定与成像面对应的关键特征点 Q_{ij} , 并在世界坐标系中计算其坐标值 $Q_{ij}(x_{ij}, y_{ij})$, 计算过程为:

$$x_{ij} = w \times i \quad (1)$$

$$y_{ij} = w \times j \quad (2)$$

式中: x_{ij} 和 y_{ij} 分别是特征点 Q_{ij} 在光平面世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 中 x, y 方向上的坐标值; w 为棋盘格的宽度。

通过 OpenCV 棋盘格图像内角点计算方法, 得到畸变成像平面 $O - uv$ 上特征点 P_{ij} 的亚像素坐标 $P_{ij}(u_{ij}, v_{ij})$ 。以成像面中心点为圆心, 将成像平面划分为等距区域: 半径为 R_1 的圆形区域 K1, 环宽为 R_2 的环形区域 K2, 以及环宽为 R_3 的环形区域 K3。 $R_1 = R_2 = R_3$, 且 $R_1 + R_2 + R_3 = R_{\max}$, R_{\max} 为像平面上亚像素点到图像中心的最大距离, 如图 3 所示。

计算成像平面上每个特征点的亚像素坐标 $P_{ij}(u_{ij}, v_{ij})$ 到图像中心的距离 $R_{P_{ij}}$, 即:

$$R_{P_{ij}} = \sqrt{\left(u_{ij} - \frac{U}{2}\right)^2 + \left(v_{ij} - \frac{V}{2}\right)^2} \quad (3)$$

式中: U 为成像平面的水平宽度 (以像素为单位); V 为成像平面的竖直宽度 (以像素为单位)。

将每个特征点到成像平面中心的距离 $R_{P_{ij}}$ 代入式 (4) 中, 以实现特征点在对应区域中的分配, 即:

$$\begin{cases} P_{ij} \in P_{K1}, Q_{ij} \in Q_{K1}, & R_{P_{ij}} \leq R_1 \\ P_{ij} \in P_{K2}, Q_{ij} \in Q_{K2}, & R_1 < R_{P_{ij}} \leq R_2 \\ P_{ij} \in P_{K3}, Q_{ij} \in Q_{K3}, & R_2 < R_{P_{ij}} \leq R_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{K1}, P_{K2} 和 P_{K3} 分别是 K1 区域、K2 区域和 K3 区域上的特征点像素坐标点集合; Q_{K1}, Q_{K2} 和 Q_{K3} 分别 K1 区域、K2 区域和 K3 区域上的特征点世界坐标点集合。

由于光学失真导致特征点之间存在非线性映射关系, 而传统的单应性变换无法准确的从具有畸变的图像平面映射到空间平面, 因此通过构建区域多模态柔性映射模型, 建立各个区域特征点之间的柔性映射关系, 映射函数为 $(x_{ij}, y_{ij}) = W(u_{ij}, v_{ij}, s)$, 该函数具体展开式如式 (5) 所示。

$$W(u_{ij}, v_{ij}, s) = \begin{cases} W_x(u_{ij}, v_{ij}, s) \\ W_y(u_{ij}, v_{ij}, s) \end{cases} \quad (5)$$

在映射函数 $(x_{ij}, y_{ij}) = W(u_{ij}, v_{ij}, s)$ 中, x_{ij}, y_{ij} 与 u_{ij}, v_{ij} 之间的具体函数关系为:

$$\begin{cases} x_{ij} = W_x(u_{ij}, v_{ij}, s) = \sum_{m=1}^s \sum_{n=0}^{s-1} a_k u_{ij}^{s-1-n} v_{ij}^n \\ y_{ij} = W_y(u_{ij}, v_{ij}, s) = \sum_{m=1}^s \sum_{n=0}^{s-1} b_k u_{ij}^{s-1-n} v_{ij}^n \end{cases} \quad (6)$$

式中: a_k 与 b_k 分别为 x_{ij} 和 y_{ij} 的映射系数, 且 $k = s(s-1)/2 + 1 + n, s \geq 1$ 。

针对各区域的不同畸变程度, 分别采用不同阶数的映射模型, 为特征点建立柔性映射关系。令式 (5) 中的

$s = f(R_{P_{ij}})$, 映射模型的阶数判断如式 (7) 所示, 模型的阶数由当前特征点所在区域确定, 即:

$$f(R_{P_{ij}}) = \begin{cases} t, & R_{P_{ij}} \leq R_1 \\ t+1, & R_1 < R_{P_{ij}} \leq R_2 \\ t+2, & R_2 < R_{P_{ij}} \leq R_3 \end{cases} \quad (7)$$

结合式 (4) ~ (7), 可以得到式 (8) 中的映射关系, 即:

$$\begin{cases} (x_{ij}, y_{ij})_{Q_{K1}} = W_1(u_{ij}, v_{ij}, t)_{P_{K1}}, & R_{P_{ij}} \leq R_1 \\ (x_{ij}, y_{ij})_{Q_{K2}} = W_2(u_{ij}, v_{ij}, t+1)_{P_{K2}}, & R_1 < R_{P_{ij}} \leq R_2 \\ (x_{ij}, y_{ij})_{Q_{K3}} = W_3(u_{ij}, v_{ij}, t+2)_{P_{K3}}, & R_2 < R_{P_{ij}} \leq R_3 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $t = 1, 2, 3, \dots, n, t-1$ 表示所使用映射模型的最低阶数。

当 $R_{P_{ij}} \leq R_1$ 时, 映射关系 $W_1(u_{ij}, v_{ij}, t)_{P_{K1}}$ 的展开形式分别如式 (9) 和 (10) 所示。

x_{ij} 与 u_{ij}, v_{ij} 的映射关系为:

$$\begin{bmatrix} 1 & u_{01} & v_{01} & \cdots & v_{01}^{t-1} \\ 1 & u_{02} & v_{02} & \cdots & v_{02}^{t-1} \\ 1 & u_{03} & v_{03} & \cdots & v_{03}^{t-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & u_{ij} & v_{ij} & \cdots & v_{ij}^{t-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \\ \vdots \\ x_{ij} \end{bmatrix} \quad (9)$$

y_{ij} 与 u_{ij}, v_{ij} 的映射关系为:

$$\begin{bmatrix} 1 & u_{01} & v_{01} & \cdots & v_{01}^{t-1} \\ 1 & u_{02} & v_{02} & \cdots & v_{02}^{t-1} \\ 1 & u_{03} & v_{03} & \cdots & v_{03}^{t-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & u_{ij} & v_{ij} & \cdots & v_{ij}^{t-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{01} \\ y_{02} \\ y_{03} \\ \vdots \\ y_{ij} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{令 } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & u_{01} & v_{01} & \cdots & v_{01}^{t-1} \\ 1 & u_{02} & v_{02} & \cdots & v_{02}^{t-1} \\ 1 & u_{03} & v_{03} & \cdots & v_{03}^{t-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & u_{ij} & v_{ij} & \cdots & v_{ij}^{t-1} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{K1} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix}, \mathbf{X}_{K1} =$$

$$\begin{bmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \\ \vdots \\ x_{ij} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{K1} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_{K1} = \begin{bmatrix} y_{01} \\ y_{02} \\ y_{03} \\ \vdots \\ y_{ij} \end{bmatrix}, \text{式 (9) 和 (10) 可简}$$

化为:

$$\mathbf{M} \times \mathbf{A}_{K1} = \mathbf{X}_{K1} \quad (11)$$

$$\mathbf{M} \times \mathbf{B}_{K1} = \mathbf{Y}_{K1} \quad (12)$$

为计算矩阵 A_{k1} , 在式 (11) 中等号两边同时左乘 M^T , 可得:

$$M^T \times M \times A_{k1} = M^T \times X_{k1} \quad (13)$$

由于矩阵 $M^T \times M$ 为可逆矩阵, 矩阵 A_{k1} 可由式 (13) 求得:

$$A_{k1} = (M^T \times M)^{-1} \times M^T \times X_{k1} \quad (14)$$

同理, 矩阵 B_{k1} 可由式 (12) 变换求得:

$$B_{k1} = (M^T \times M)^{-1} \times M^T \times Y_{k1} \quad (15)$$

根据式 (14) 和 (15), 最终求得映射关系 $W_1(u_{ij}, v_{ij}, t)_{P_{k1}}$ 中 x_{ij}, y_{ij} 的映射系数矩阵 A_{k1} 和 B_{k1} 。在映射系数矩阵 A_{k1} 和 B_{k1} 中, $k = t(t-1)/2 + t$, 将映射系数记为 $N_1 = [A_{k1}, B_{k1}]$, 完成 K1 区域标定。同理, 求解出 K2、K3 区域的映射系数矩阵, 并分别记为 $N_2 = [A_{k2}, B_{k2}]$ 和 $N_3 = [A_{k3}, B_{k3}]$ 。

将映射系数 N_1, N_2 和 N_3 分别代入式 (8) 中, 从而建立像素坐标与世界坐标的统一映射模型, 最终完成光平面整体标定。统一映射关系如式 (16) 所示, 标定方法流程如图 4 所示。

$$(x, y) = \begin{cases} W_1(u, v, t), & R_{p_i} \leq R_1 \\ W_2(u, v, t + 1), & R_1 < R_{p_i} \leq R_2 \\ W_3(u, v, t + 2), & R_2 < R_{p_i} \leq R_3 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $R_{p_i} = \sqrt{\left(u - \frac{U}{2}\right)^2 + \left(v - \frac{V}{2}\right)^2}$ 。

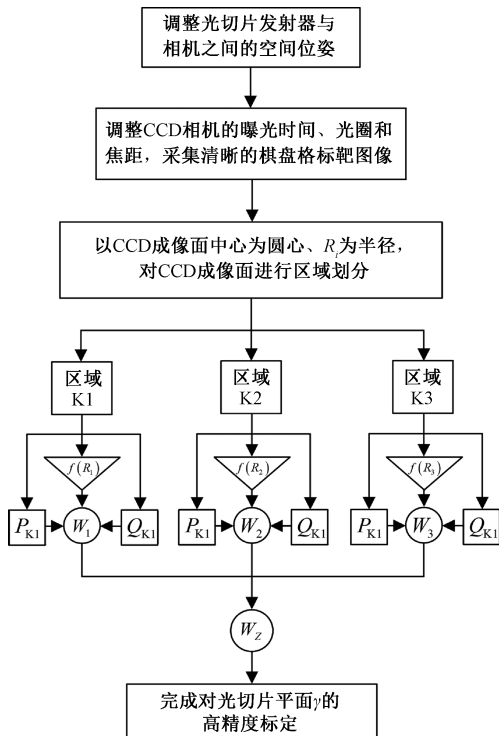


图 4 光切片平面标定流程

Fig. 4 The procedure of light plane calibration

2 实验验证

2.1 标定实验

本节介绍光平面标定实验。实验硬件包括来自 Basler 公司的面阵 CCD 相机 (型号: a2A1920 - 51gmBAS), 其分辨率为 1 440 pixels × 1 080 pixels。相机配备镜头来自日本 Computar 公司的 35 mm 焦距工业镜头。光切片发射器采用波长为 405 nm 的蓝光光源。标定靶标为陶瓷棋盘格, 具有 11 × 8 个内角点, 单个方格尺寸为 1.5 mm, 精度优于 1 μm。面阵 CCD 相机与光切片发射器之间采用刚性连接, 二者间距离约为 130 mm, 如图 5 所示。

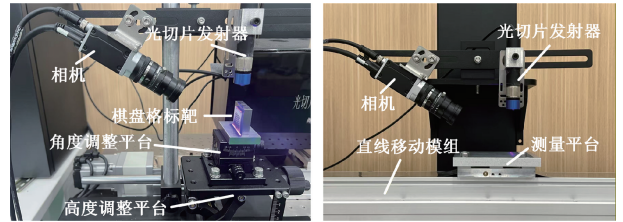


图 5 标定与测量系统硬件设备

Fig. 5 Diagram of the calibration and measurement system hardware equipment

通过调节角度调整平台和高度调整平台, 使棋盘格平面与光切片平面严格重合, 调节镜头的焦距、光圈与曝光时间, 采集清晰的棋盘格图像。计算 CCD 成像面上棋盘格内角点的亚像素坐标 $P_{ij}(u_{ij}, v_{ij})$ 。经计算得到成像面中最远点到中心点的最大距离为 $R_{max} = 900$ pixels。中心圆形区域 K1 的半径为 $R_1 = 300$ pixels, 中间环形区域 K2 的环宽为 $R_2 = 300$ pixels, 外侧环形区域 K3 的环宽为 $R_3 = 300$ pixels。计算成像平面上各个特征点到中心点的距离 $R_{p_{ij}}$, 并将其代入式 (4) 中, 实现特征点对应区域中的分类, 结果如图 6 所示。

将各区域内特征点的亚像素坐标与世界坐标代入式 (8) 中, 分别求得区域 K1、K2 和 K3 的映射系数矩阵 N_1, N_2 和 N_3 。理论上, 矩阵协同模型的阶数越高, 特征点间的映射精度越高; 但同时映射系数的参数数量也随之增加, 从而显著提高计算量。在本实验中, 为同时确保映射精度与计算效率, 将模型阶数设定为 $t = 4$ 作为示例, 此时矩阵协同模型的最低阶为 3。因此区域 K1、K2 和 K3 的模型阶数分别为 3、4 和 5。随后, 将区域 K1 内特征点的亚像素坐标与世界坐标代入式 (14) 与 (15) 中, 计算得到映射系数 N_1 ; 同理可计算出 N_2 与 N_3 , 成整个光平面的标定。

基于标定模型, 根据棋盘格内角点的亚像素坐标 $P_{ij}(u_{ij}, v_{ij})$, 可计算出标定后对应内角点的世界坐标

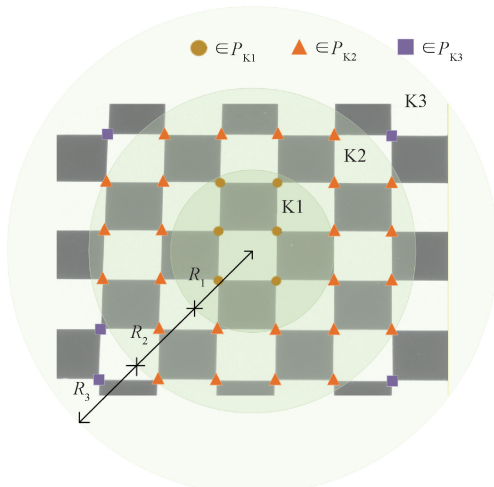


图6 区域划分与特征点区域分配

Fig. 6 Area segmentation and feature point area assignment

$Q'_{ij}(x'_{ij}, y'_{ij})$ 。在标定后的内角点世界坐标 $Q'_{ij}(x'_{ij}, y'_{ij})$ 与棋盘格内角点真实世界坐标 $Q_{ij}(x_{ij}, y_{ij})$ 之间进行残差评估。以36个特征点为样本,计算得到 x 方向的平均残差为 $x_{ARE} \approx 1.14896 \times 10^{-2} \mu\text{m}$, y 方向的平均残差为 $y_{ARE} \approx 7.54624 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 。根据欧氏距离公式,可计算得到平均残差距离 $d_{ARE} = \sqrt{x_{ARE}^2 + y_{ARE}^2} \approx 1.15409 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 。

将所提出的方与未对成像面进行区域划分的三到五阶映射模型进行对比。不同模型在映射前后特征点之间的残差结果如图7所示。随着模型阶数的增加,整体距离残差逐渐减小,映射精度持续提升。同时,模型阶数越高,外围特征点的映射精度改善越明显,而中心区域的精度变化不大。与其他3种方法相比,所提出的模型在 x 方向和 y 方向上的距离残差均降低了一个数量级。此外,在中心区域的映射精度也得到显著提升。

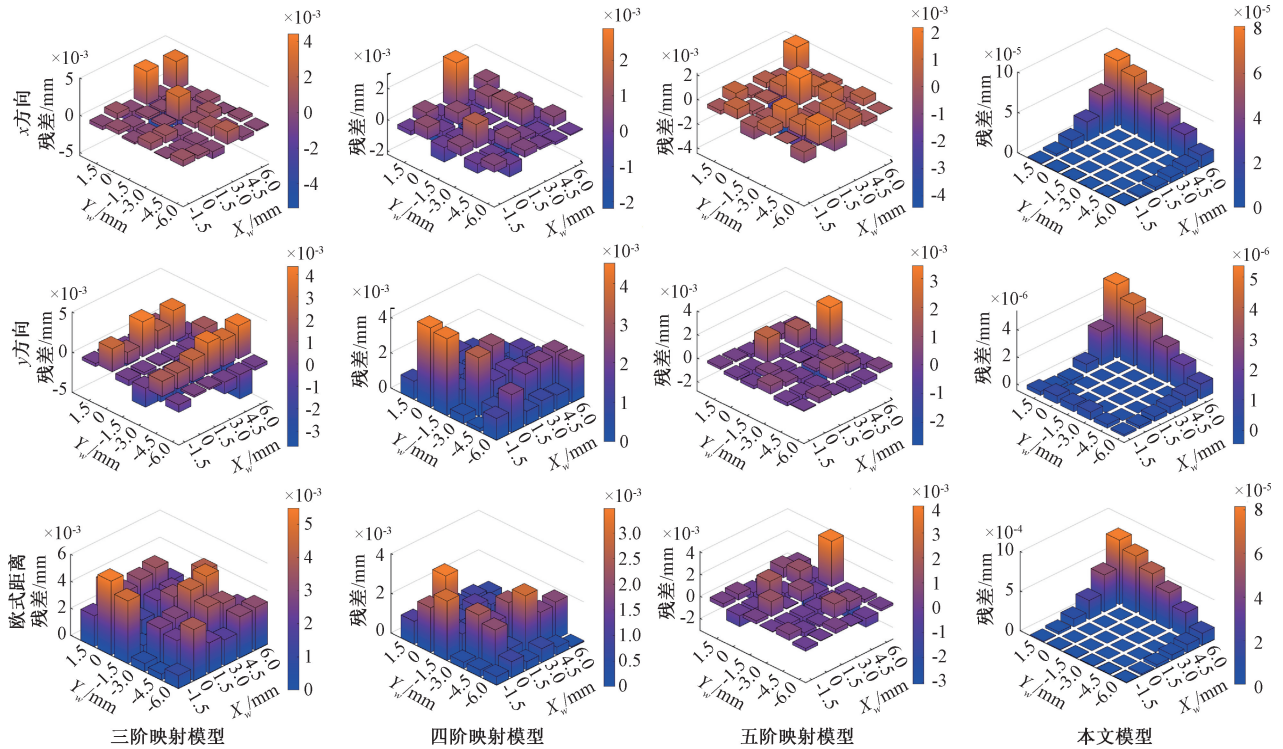


图7 不同方法的映射精度对比

Fig. 7 Comparison of mapping accuracy between different methods

上述映射模型均基于同一棋盘格标靶上的特征点数据,保证了特征提取引入的系统性误差在各模型间保持一致,从而确立了对比实验的有效性基准。相比于点对点的刚性变换,上述对比模型均为柔性映射模型,高阶拟合过程能够对单点提取带来的随机高频噪声起到平滑和抑制作用,从而降低了单个角点提取误差对全局映射系数的影响。在此基础上,本文提出的区域多模态柔性映射针对不同程度畸变采用不同阶数拟合,进一步提高全

视场整体映射精度。

2.2 测量精度分析

为验证所提方法的标定精度与系统的测量性能,对标定后的光切片系统开展了重复性测量与全视场精度评估。选取厚度分别为1~7 mm的量块(精度:0级)作为测试对象。将光切片垂直投射到各量块表面,获取多组光切片条纹,如图8所示。

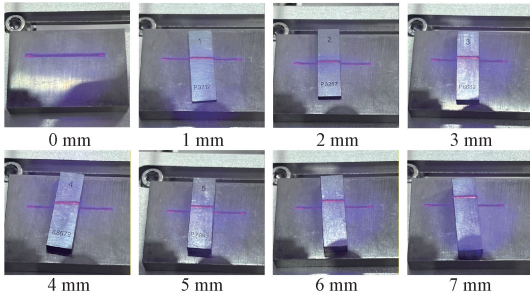


图 8 测量不同尺寸量块

Fig. 8 Measurement of standardized blocks of different sizes

在所有实验中,光条纹中心线的提取均采用基于加权降维的多模态高精度中心线提取方法^[20]。由于实验硬件装置保持一致,且在相同条件下获取了多组图像,因此光平面标定精度的影响因素在整个测量过程中保持一致。提取得到的条纹中心线如图 9 所示。

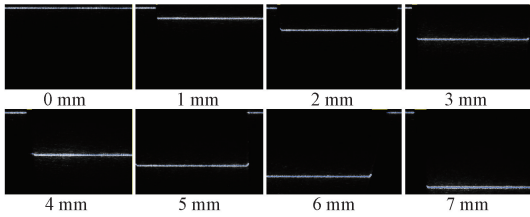


图 9 不同尺寸量块上光条中心线的提取

Fig. 9 Extraction of the centerline of light stripes on blocks with different sizes

由于量块在标准参考温度 20℃ 下的标称值与实际值存在一定偏差,所有重复性测量数据均在室温 20℃ 下获取,即各量块的实际参考值为:

$$l_{ref} = l_{nom} + \alpha \quad (17)$$

式中: l_{ref} 是量块的真实参考值; l_{nom} 是量块的额定值; α 是量块在 20℃ 的偏差。

重复性测量过程以参考平面作为零位,即将该平面的高度设为 0。因此,叠放在参考平面上的标准量块的理论高度对应于各量块的宽度(标称值)。通过计算被测量块轮廓上光条中心点的平均高度差,进行重复性测量实验,每个量块连续测量 800 次。各个量块重复性测量结果及其对应的测量标准差如图 10 所示。

根据重复测量结果计算各量块的测量尺寸偏差。量块的高度误差定义为:

$$e_{height} = l_{avg} - l_{nom} - \alpha \quad (18)$$

其中, l_{avg} 是 800 次测量值的平均值,所得均值与偏差结果如表 1 所示。

如图 10(h) 所示,7 组测量的标准差均保持在约 0.1 μm 左右,其中最大标准差为 0.164 μm ,最小标准

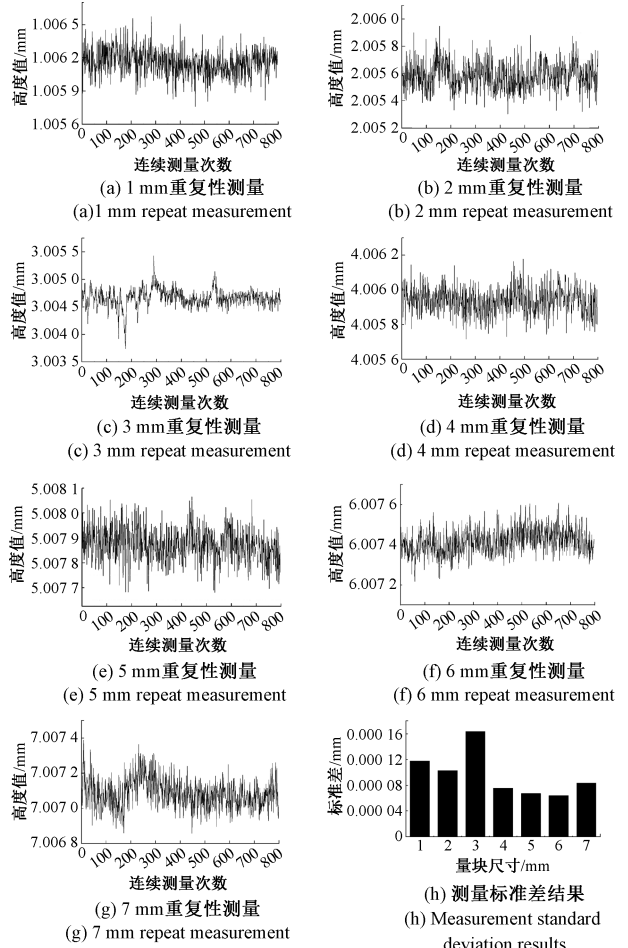


图 10 各个量块重复性测量 800 次曲线图和测量标准差
Fig. 10 Results of 800 repeated measurements and standard deviations for each gauge block

差为 0.064 μm 。表 1 中各组测量误差均在 8 μm 以内,最大误差为 7.742 μm ,最小误差为 4.432 μm 。7 组测量的 RMSE 为 6.461 μm 。

表 1 各量块的测量均值及偏差

Table 1 Measurement means and deviations for various gauge blocks (mm)

序号	l_{nom}	α	l_{avg}	e_{height}
1	1.00	-0.25×10^{-3}	1.006 156	0.006 406
2	2.00	-0.22×10^{-3}	2.005 584	0.005 804
3	3.00	0.23×10^{-3}	3.004 662	0.004 432
4	4.00	-0.04×10^{-3}	4.005 937	0.005 977
5	5.00	0.13×10^{-3}	5.007 872	0.007 742
6	6.00	0.15×10^{-3}	6.007 516	0.007 366
7	7.00	0.16×10^{-3}	7.007 084	0.006 924

为验证所提模型在实际测量中的精度提升,选取原

始模型中精度最高的五阶映射模型进行对比。使用相同设备对同一组量块进行测量,确保硬件条件一致,相机与光切片发射器之间的空间位置保持不变。五阶映射模型与所提出模型的800次测量均值误差如图11所示。

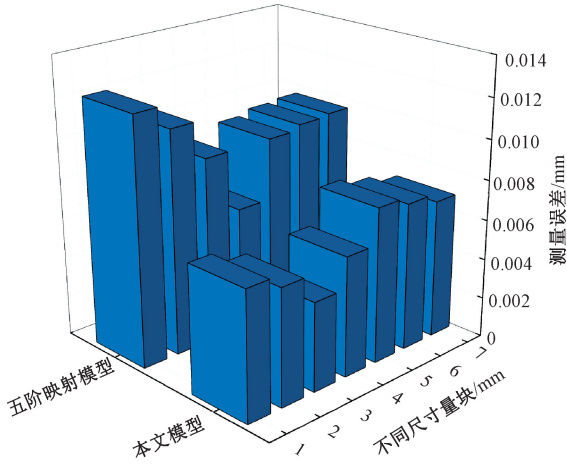


图11 五阶映射模型与所提模型的测量误差对比

Fig. 11 Comparison of measurement errors between the fifth-order mapping model and the proposed model

所提出模型的整体测量精度与五阶映射模型相比,误差保持在 $8\ \mu\text{m}$ 以内。五阶映射模型的最小测量误差出现在 $4\ \text{mm}$ 量块处,误差值为 $6.213\ \mu\text{m}$,而所提模型在同一量块处的测量误差为 $5.977\ \mu\text{m}$,提高了 $0.236\ \mu\text{m}$ 。值得注意的是,在成像面上远离光轴的位置,即测量 1 、 2 、 6 和 $7\ \text{mm}$ 量块时,所提出模型相比五阶映射模型的测量精度有显著提升,最大精度提升可达 $5.91\ \mu\text{m}$ 。

为验证该标定方法的重复性与鲁棒性,在相同的室温 20°C 环境下,使用相同设备进行了两次额外的标定与测量实验,其中两组测量实验均和前述测量实验流程一致。3组测量数据的测量偏差如图12所示,测量标准差如图13所示。

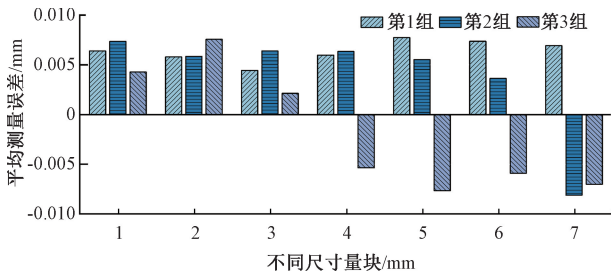


图12 3组标定实验中800次测量平均误差

Fig. 12 Average error statistics of 800 measurements in three calibration experiments

从图12中可以看出3组测量数据存在轻微差异,这主要归因于标定过程中微小的角度偏差。第1组在3与

$4\ \text{mm}$ 量块之间出现正负偏差,而第3组在6与 $7\ \text{mm}$ 量块之间呈现类似波动。相比之下,第1组的所有偏差均为正值。然而,通过3组标定实验,系统始终保持测量精度范围在 $\pm 0.01\ \text{mm}$,体现了所提方法的高标定精度。如图13所示,经过3轮标定,所有实验的测量标准差均控制在 $0.3\ \mu\text{m}$ 以内,这表明该测量系统在连续测量过程中具有极高的稳定性,保证后续3D重建的高精度连续扫描。

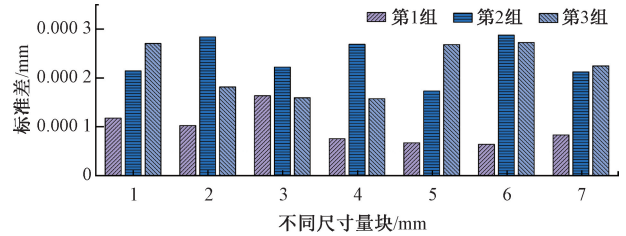


图13 3组标定实验中800次测量标准差

Fig. 13 Standard deviation statistics of 800 measurements in three calibration experiments

2.3 标定方法的对比

本节将本文方法与交比不变法进行对比。在对比实验中,已标定完成的测量系统对量块高度进行连续测量,以 20°C 下量块的标称高度作为计算RMSE的真实值,两种方法的测量结果、测量误差以及RMSE如表2所示。

表2 两种不同方法测量结果

Table 2 Comparison of measurement results by two different methods (mm)

序号	l_{nom}	交比不变法		本文方法	
		测量值	误差	测量值	误差
1	1.00	1.033 425	0.033 655	1.006 156	0.006 406
2	2.00	2.047 713	0.047 933	2.005 584	0.005 804
3	3.00	3.031 294	0.031 064	3.004 662	0.004 432
4	4.00	4.037 352	0.037 392	4.005 937	0.005 977
5	5.00	5.036 177	0.036 047	5.007 872	0.007 742
6	6.00	6.043 551	0.043 411	6.007 516	0.007 366
7	7.00	7.038 974	0.038 814	7.007 084	0.006 924
RMSE		0.038 604		0.006 461	

由表2中的测量数据可知,采用所提方法测得的最大误差为 $0.007\ 742\ \text{mm}$,最小误差为 $0.004\ 432\ \text{mm}$ 。相比之下,交比不变法的最大误差为 $0.047\ 933\ \text{mm}$,最小误差为 $0.031\ 064\ \text{mm}$ 。由此可见,本文方法的平均测量精度相比传统方法提升了一个数量级,均方根误差降低了83.26%。

3 三维重建

光切片三维重建平台如图 14 所示。软件部分采用基于 C# 的界面开发,核心算法通过 C++ 动态链接库实现,从而完成三维重建与实时可视化。系统的电控部分以 SMC304-BAS 运动控制器为核心控制单元,用于生成并下发运动指令。控制器通过脉冲与方向信号驱动 L7P400 交流伺服驱动器,进而控制 ACM2H-0604 系列伺服电机,实现高精度的位置、速度和力矩控制。伺服电机直接连接到 CFG8-L10-500-BC-LY400-C4 精密直线模组,构成完整的运动执行机构。

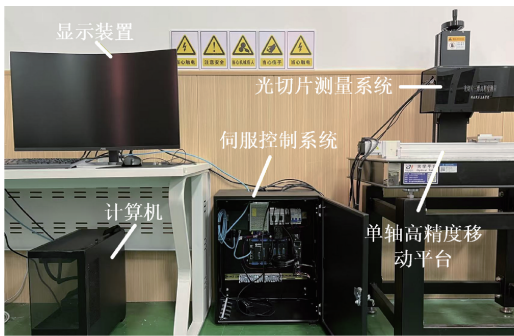


图 14 光切片三维重建平台

Fig. 14 The sheet-of-light 3D reconstruction platform

在扫描过程中,采用雷赛(Leadshine)运动控制器配合单轴高精度直线移动平台,当被测物体沿扫描方向每移动预设步长 r (单位为 mm) 时,平台会向光切片系统发送一次触发脉冲。系统响应脉冲并采集光平面坐标系 $O_w - X_w Y_w$ 下的二维轮廓点云坐标 (x_w, y_w) 。该采集过程迭代 i 次 ($i = 1, 2, 3, \dots, n$),直至覆盖物体全长,最终完成三维空间重建。在每一次迭代中均执行区域多模态柔性映射,以实现光切片剖面空间物理数据的快速耦合。最终可得到物体表面的三维点云坐标 $(x_w, y_w, i \cdot r)$,完成对物体表面的三维重建。

光切片三维重建系统的测量范围可以根据不同测量场景进行调整。为满足后续三维重建范围要求,对光切片三维重建系统进行视场调整,并对重建基面进行扫描,设定扫长度为 20 mm,得到扫描平面范围,如图 15 所示。

由于扫描长度根据物体长度进行设定,因此 X 方向上的长度(即成像系统获取光切片条纹的长度)决定了扫描平面的范围,该测量系统的扫描宽度约为 25 mm。三维重建的深度范围为 22 mm 左右,为验证系统在深度范围内的测量精度,分别对 1~20 mm 不同尺寸量块进行 800 次重复性测量,每组测量取平均值,测量误差结果如图 16 所示。

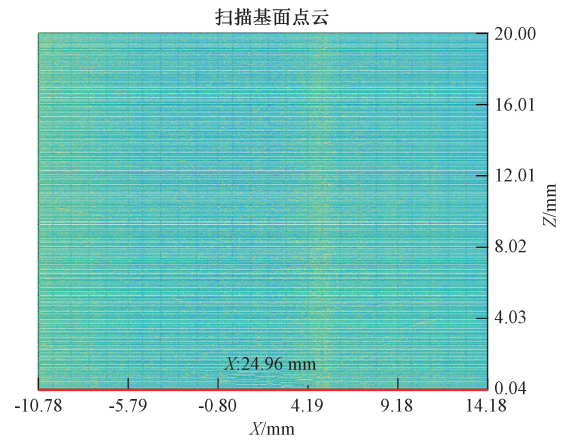


图 15 三维重建基面点云图

Fig. 15 3D reconstruction points cloud of the base surface

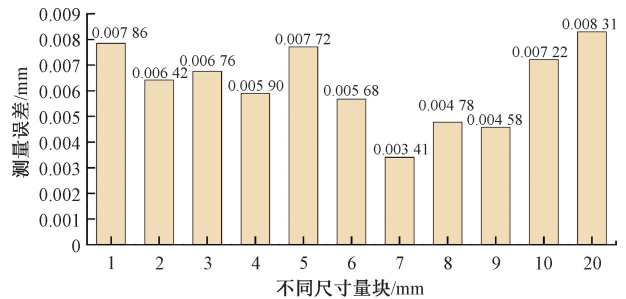


图 16 深度范围测量精度

Fig. 16 Measurement accuracy over the depth range

从图 16 可以看出,在 1~20 mm 的深度范围,最大测量误差为 8.31 μm ,最小测量误差为 3.41 μm ,RMSE 为 6.41 μm 。相较于 2.2 小节中的测量结果,最大和最小误差变换在 1 μm 左右, RMSE 相差微小,因此该三维重建系统在 0~22 mm 的深度范围测量精度为 6.5 μm 。

所测物体如图 17(a) 所示,三维点云显示结果如图 17(b) 所示。由于金属材料具有较强的反射特性,扫描过程中不可避免地会产生噪声,主要集中在开槽金属连接板的侧边、一角硬币的凸起边缘处,如图 17(b) 中的方框所示。开槽金属连接板的表面平整且经过喷砂处理,因此扫描过程中产生的噪声点较少,滤波与封装后的三维重建结构较为理想,如图 17(c) 所示。相比之下,硬币金属表面反射率较高,经过滤波与封装处理,三维重建结果中仍残留部分噪声点,如图 17(c) 中的方框所示。

从不同材质的重建结果可以看出,光条纹中心的提取精度是影响重建结果的关键因素。本文采用基于加权降维的多模态中心线提取算法,在 2.2 节的实验表明,采用该方法的测量系统可实现约 0.1 μm 的测量标准差,具

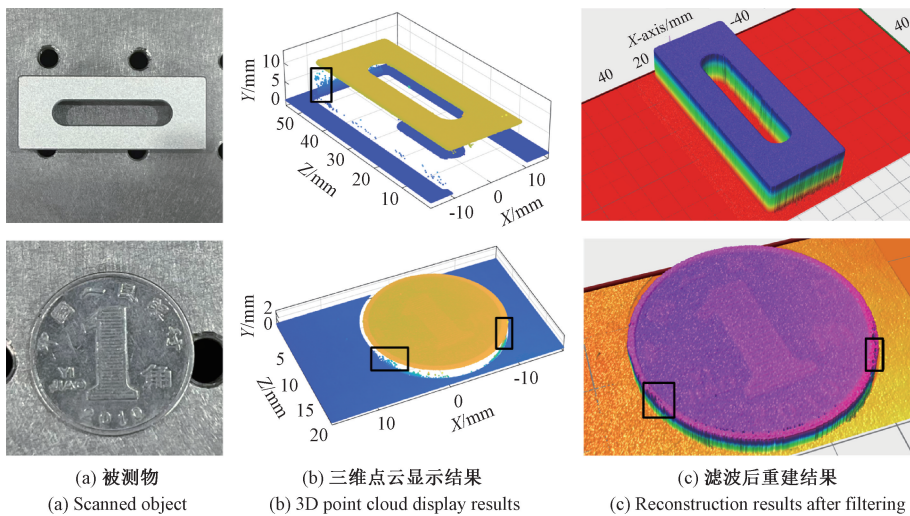


图17 光切片三维重建

Fig. 17 The sheet-of-light 3D reconstruction

有极高稳定性。然而,针对金属高反光表面(如硬币边缘),由于散斑和过饱和现象引起的中心偏移误差;并且边缘处的光切片在扫描基面与被测物侧面之间存在多重反射,产生的伪影影响切片光束的提取,目前主要通过后续的点云滤波算法进行平滑处理,这也是光学测量领域普遍面临的挑战之一。

4 结 论

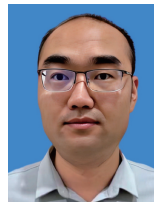
本研究提出了一种基于区域多模态柔性映射的光切片三维重建系统光平面标定方法。该方法基于棋盘格图像内角点坐标作为光平面标定计算控制点,将标定过程中光平面方程求解问题转化成像素和世界坐标系中控制点之间的映射问题。构建区域多模态柔性映射模型,在各区域特征点的像素坐标和世界坐标之间建立映射关系。仅需一次整体柔性映射,在完成精细化畸变矫正的同时,实现光平面的高精度标定。该方法无需进行光切片条纹中心提取,从而避免了图像处理算法引入的误差,同时也省去了固有参数矩阵和外参矩阵的繁琐计算,简化了标定流程。实验结果表明,标定前后控制点的映射精度达到 1.5234×10^{-5} mm。相机视场范围内进行多组800次重复性测量后,其最大误差为 $8.31 \mu\text{m}$,最小误差为 $3.41 \mu\text{m}$,RMSE 在 $6.5 \mu\text{m}$ 以内,满足高精度工业三维测量的要求。对比实验与三维重建评估进一步验证了该方法的高精度与实际应用价值。基于区域多模态柔性映射的光切片平面标定方法在三维重建应用中展现出显著潜力。

参考文献

- [1] SCHLARP J, CSENCIS E, SCHITTER G. Optical scanning of a laser triangulation sensor for 3-D imaging[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 3606-3613.
- [2] NAVERSCHNIGG C, CSENCIS E, SCHITTER G. Flexible robot-based in line measurement system for high-precision optical surface inspection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9.
- [3] CHEN L ZH, HE J Y, WU Y Y, et al. Detection and 3-D visualization of human tooth surface cracks using line structured light [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(9): 13958-13967.
- [4] CHEN L, LIU ZH T, LIN F L, et al. Tunnel excavation slag volume measurement using triple-line structured-light vision: Rectification and optimization [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 181: 108450.
- [5] 刘涛, 关添航, 杜宏旺, 等. 基于线结构光的水下旋转扫描高精度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 44-53.
LIU T, GUAN T H, DU H W, et al. Research on the high precision measurement method of underwater rotary scanning based on linear structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 44-53.
- [6] 孙传富, 彭涛, 陆永刚, 等. 连铸坯三维测量多线结构光的中心条纹快速提取[J]. 光学精密工程, 2023, 31(3): 380-392.
SUN CH F, PENG T, LU Y G, et al. Fast extraction center stripe of multi-line-structured light for three-

- dimensional measurement of casting slab[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(3): 380-392.
- [7] 于龙龙, 李艳文, 栾英宝, 等. 基于二维平面靶标的线结构光标定[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(6): 124-131.
YU L L, LI Y W, LUAN Y B, et al. Line structured light calibrating based on two-dimensional planar target[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(6): 124-131.
- [8] 刘昌文, 段发阶, 李杰, 等. 线结构光三维传感器扫描方向标定方法[J]. *中国激光*, 2023, 50(5): 58-64.
LIU CH W, DUAN F J, LI J, et al. A scanning direction calibration method of line-structured light three-dimensional sensors [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(5): 58-64.
- [9] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [10] 刘建鑫, 纪超洋, 李艳文, 等. 基于平面靶标的交叉结构光标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(4): 185-193.
LIU J X, JI CH Y, LI Y W, et al. High-precision cross structured light calibration method based on planar target[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(4): 185-193.
- [11] 潘海鸿, 王耀玮, 徐大斌, 等. 使用非特制靶标实现线结构光平面标定[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 54-60.
PAN H H, WANG Y W, XU D B, et al. Calibration of line-structure light plane using non-specific target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 54-60.
- [12] KIDDEE P, FANG Z J, TAN M. A practical and intuitive calibration technique for cross-line structured light[J]. *Optik*, 2016, 127(20): 9582-9602.
- [13] YIN L, WANG X J, NI Y B. Flexible three-dimensional reconstruction via structured-light-based visual positioning and global optimization [J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1583.
- [14] ZHOU F Q, ZHANG G J. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations [J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(1): 59-67.
- [15] PAN X, LIU ZH. High-accuracy calibration of line-structured light vision sensor by correction of image deviation [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4364-4385.
- [16] BOK Y, JEONG Y, CHOI D G, et al. Capturing village-level heritages with a hand-held camera-laser fusion sensor [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2011, 94: 36-53.
- [17] LIU CH W, DUAN F J, FU X, et al. A method to reduce the systematic error of line-structured light sensors based on light plane correction[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 159: 107217.
- [18] 陈天飞, 马孜, 吴翔. 基于主动视觉标定线结构光传感器中的光平面[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 256-263.
CHEN T F, MA Z, WU X. Calibration of light plane in line structured light sensor based on active vision [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 256-263.
- [19] YONEYAMA S, KIKUTA H, KITAGAWA A, et al. Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement[J]. *Optical engineering*, 2006, 45(2): 023602.
- [20] CHEN X H, YANG G, WU X T, et al. Multi-model high-precision 3D measurement method dominated by weighted dimensionality reduction[J]. *Optics&Laser Technology*, 2025, 192: 113586.

作者简介



陈晓辉(通信作者), 2007年于华中科技大学获得硕士学位, 2011年于华中科技大学获得博士学位, 现为湖北汽车工业学院副教授, 主要研究方向为光学测量和机器视觉。

E-mail: 20230011@huat.edu.cn

Chen Xiaohui (Corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from the Huazhong University of Science and Technology in 2007 and 2011, respectively. He is currently an associate professor at Hubei University of Automotive Technology. His main research interests include optical measurement and machine vision.



钟毓宁, 1991年于华中理工大学获得博士学位, 现为湖北开放大学教授, 主要研究方向为测试计量技术及仪器、机械可靠性。

E-mail: ld_zhong@sina.com

Zhong Yuning received his Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1991. He is currently a professor at Hubei Open University. His main research interests include measurement technology and instruments as well as mechanical reliability.