

### 基于双向条纹点云匹配的复杂纹理误差校正

张正祺 陈玉翀 达飞鹏 盖绍彦

#### Error correction of complex texture objects based on bidirectional fringe projection point cloud matching

ZHANG Zheng-qi, CHEN Yu-chong, DA Fei-peng, GAI Shao-yan

引用本文:

张正祺, 陈玉翀, 达飞鹏, 盖绍彦. 基于双向条纹点云匹配的复杂纹理误差校正[J]. *中国光学*, 2025, 18(5): 1086–1096. doi: 10.37188/CO.2025–0040

ZHANG Zheng-qi, CHEN Yu-chong, DA Fei-peng, GAI Shao-yan. Error correction of complex texture objects based on bidirectional fringe projection point cloud matching[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1086–1096. doi: 10.37188/CO.2025–0040

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0040>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于相移条纹投影的动态3D测量误差补偿技术

Dynamic 3D measurement error compensation technology based on phase-shifting and fringe projection

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(1): 184 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022–0004>

#### 逐像素调制的高反光表面三维测量方法

Three-dimensional measurement method of highly reflective surface based on per-pixel modulation

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(3): 488 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0220>

#### 复杂曲面零件面结构光扫描视点规划

Viewpoint planning of surface structured light scanning for complex surface parts

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(1): 113 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0026>

#### 显微条纹投影小视场三维表面成像技术综述

3D small-field surface imaging based on microscopic fringe projection profilometry: a review

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(3): 447 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0199>

#### 光栅投影在机三维形貌检测技术研究进展

Research progress of grating projection on machine 3D topography inspection technology

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(3): 500 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0083>

#### 高温数字图像相关法变形测量中玻璃介质误差校正

Error correction of glass mediums in high-temperature digital image correlation deformation measurement

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(2): 327 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0144>

文章编号 2097-1842(2025)05-1086-11

## 基于双向条纹点云匹配的复杂纹理误差校正

张正祺<sup>1,2</sup>, 陈玉舫<sup>1,2</sup>, 达飞鹏<sup>1,2</sup>, 盖绍彦<sup>1,2\*</sup>

(1. 东南大学自动化学院, 江苏南京 210096;

2. 东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘要:**在结构光三维测量系统中,相机离焦现象不可避免。在离焦的影响下,物体表面的复杂纹理会引入显著的相位误差,影响测量精度。本文针对该问题,分析并构建了该相位误差的理论模型,指出了其与纹理变化方向的关系,并由此提出了一种基于双向条纹点云匹配的复杂纹理误差校正方法。理论上,通过投影横纵条纹图案获得的双向相位信息应解出完全一致的点云。基于这一原理,本文提出以最小化横纵点云对应点距离为目标,修正每个点对应的相位,最终得到校正后的点云。为了消除标定参数误差导致的点云整体偏移,本文通过点云匹配进行了预校正。对比实验结果表明:相较传统方法,本文方法的平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)最高可分别降低33.6%和39.1%。本文方法能够以更高的精度重建具有复杂纹理的物体。

**关键词:**三维测量;结构光;相移法;复杂纹理;相位图校正

中图分类号:TP394.1;TH691.9 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2025-0040 CSTR:32171.14.CO.2025-0040

## Error correction of complex texture objects based on bidirectional fringe projection point cloud matching

ZHANG Zheng-qi<sup>1,2</sup>, CHEN Yu-chong<sup>1,2</sup>, DA Fei-peng<sup>1,2</sup>, GAI Shao-yan<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

\* Corresponding author, E-mail: qxxymm@163.com

**Abstract:** In structured light 3D measurement systems, defocusing of the camera is inevitable. Because of camera defocus, the object's complex surface texture introduces substantial phase errors, degrading measurement accuracy. To address this issue, this paper analyzes and formulates an error model for phase distortions arising from complex textures, and elucidates the relationship between the phase error and the direction of texture edge. Thus, a correction method for complex texture errors based on bidirectional fringe projection point cloud fitting is proposed. Theoretically, the bidirectional phase information obtained by projecting hori-

收稿日期:2025-03-07; 修订日期:2025-04-02

基金项目:江苏省重大科技专项(No. BG2024003);江苏省前沿引领技术基础研究专项(No. BK20192004C);江苏省高校优势学科建设工程资助课题

Supported by Major Science and Technology Project of Jiangsu Province (No. BG2024003); the Special Project on Basic Research of Frontier Leading Technology of Jiangsu Province (No. BK20192004C); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

zontal and vertical fringe patterns should yield perfect consistent point clouds. Thus, the method corrects the phase by minimizing the Euclidean distance between the corresponding points in the horizontal and vertical point clouds, ultimately obtaining the corrected point cloud. To remove global shifts from calibration parameter errors, a pre-correction process is applied through point cloud matching. In comparative experiments, our method achieves up to 33.6% reduction in the mean absolute error (MAE) and 39.1% reduction in the root mean square error (RMSE) versus conventional approaches. These results demonstrate its superior accuracy for reconstructing objects with complex texture.

**Key words:** 3D measurement; structured light; phase shifting method; complex texture; phase map correction

## 1 引言

条纹投影轮廓术 (Fringe Projection Profilometry, FPP)<sup>[1-2]</sup> 因具有测量速度快、精度高、成本低等优势, 在工业生产、智能机器人、逆向工程、虚拟现实、医疗等领域<sup>[3-8]</sup> 有着广泛的应用。然而, 该系统在实际应用中仍面临许多的复杂情况, 如高反光场景<sup>[9-10]</sup>、动态场景<sup>[11]</sup>、复杂纹理场景<sup>[12-13]</sup> 等。FPP 等光学系统中, 不可避免地存在相机离焦问题, 这会导致一个相机像素接收的光强并不来源于物体表面的一个特定点, 而是物体表面一定区域内的反射光强与点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 的卷积。若此区域中表面反射率不是一个常数, 则会导致其中各点的光强相互干扰, 产生相位误差。因此, 对于纹理较为简单的物体, FPP 能够获得良好的测量精度, 但对于纹理较为丰富的物体, 其表面各处反射率的不同会严重干扰物体的重建效果。为了解决这个问题, 研究人员提出了多种误差补偿方法, 主要包括基于点扩散函数的补偿方法与基于额外信息的补偿方法。

基于点扩散函数的补偿方法通过估计每个像素的 PSF 分布, 分析误差像素的邻域像素对其的影响并补偿误差值。Rao 等<sup>[14]</sup> 基于相机获取的条纹图得到一个边缘更清晰的图, 以估计相机 PSF 的模糊参数, 随后再通过此 PSF 计算此点的相位误差并进行修正。Wu 等<sup>[15]</sup> 针对复杂纹理物体的测量误差进行了详细的模拟实验分析, 并提出利用对标定板的测量结果估算相机 PSF 分布, 以对图像进行补偿。Hu 等<sup>[16]</sup> 在分析离焦误差时指出, 对一个临近反射率突变处的点, 其 PSF 域

的半径相对于纹理的曲率半径是一个小量。因此, 可以将这个邻域内的反射率分界线近似视为直线, 而误差可以认为沿纹理的法线方向变化。利用这个性质, 可近似将二维的误差函数转化为一维, 并得到补偿的具体形式。

除了上述方法外, 一些研究人员选择加入额外的设备或通过获取额外的条纹图, 使用额外的相位信息补偿相位误差。Yao 等<sup>[17]</sup> 通过计算证明, 相机离焦导致的相位误差的大小与相机图像中的条纹宽度成反比。通过在原有的单目测量系统中加入第二个投影仪, 可根据两次测量中符号相反的误差对相位进行修正。这种方法需要额外的测量设备, 并会导致多目测量系统的误差累计问题。Juarez-Salazar 等<sup>[18]</sup> 研究了条纹投影的方向数对精度的影响。实验证明, 投影第二种朝向的条纹图有助于提高系统的测量精度。Guo 等<sup>[19]</sup> 同样有类似的发现, 研究人员选择投影横纵两种方向的条纹, 根据各点邻域内的纹理方向选择误差较小的一组条纹计算三维坐标。实验证明, 这种方法对于纹理沿水平与垂直方向分布的物体有着良好的补偿效果。

为解决现有方法存在的问题, 本文提出了一种基于双向条纹投影的复杂纹理误差修正方法。推导出相位误差与纹理方向的关系, 并以此计算双向条纹的相位误差比。通过投影横纵两个方向的条纹图案, 可获得双向相位信息。基于双向相位生成的点云中对应点的匹配关系和相位误差比, 修正每个点对应的相位, 最终得到校正后的点云。此外, 为了消除系统标定参数误差导致的点云整体偏移, 本文通过点云匹配进行了预校正。通过与传统方法的对比实验表明, 本文方法能够以更高精度重建具有复杂纹理的物体。

## 2 基本原理

### 2.1 基于 FPP 的复杂纹理测量误差分析

如图 1 所示, 一个典型的 FPP 测量系统由一个数字光处理 (Digital Light Procession, DLP) 投影仪与一个电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 相机组成。在测量物体前, 首先要设计一系列的条纹编码图案, 并对相机与投影仪进行标定。测量时, 投影仪将编码的条纹图案依次投影到被测物体表面, 并由相机同步采集由被测物体表面形貌调制得到的条纹图案。随后, 计算机根据获取的条纹图案进行解相位、解包裹相位等步骤, 获得携带被测物体三维信息的相位数据。最后, 根据标定获得的相机与投影仪的三角关系解出被测物体的三维点云数据。

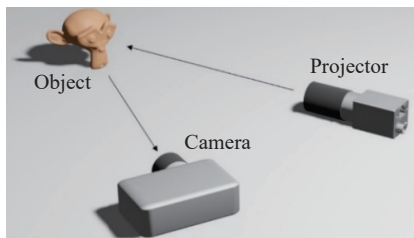


图 1 FPP 测量系统

Fig. 1 FPP measurement system

#### 2.1.1 FPP 测量基本原理

投影仪需要投影一组带相移的正弦条纹, 强度  $I_n^p$  可表示为:

$$I_n^p(u_p, v_p) = I_0 + I_1 \cos[\varphi(u_p, v_p) + \delta_n], n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中:  $N$  为相移总步数;  $n$  为第  $n$  步相移;  $I_0$  为投影图案的平均强度;  $I_1$  为调制强度;  $(u_p, v_p)$  为投影仪坐标;  $\varphi$  为待求的包裹相位;  $\delta_n = \frac{2\pi(n-1)}{N}$  为第  $n$  步相移图的条纹相移量。

相移条纹经物体表面调制后, 理想条件下相机获取的条纹图像  $I_n^c$  可表示为:

$$I_n^c(u_c, v_c) = r(u_c, v_c) I_n^p(u_c, v_c) + I_b(u_c, v_c), \quad (2)$$

式中:  $(u_c, v_c)$  为相机坐标;  $r$  为物体点的反射率;  $I_b$  为背景光强。

根据相移法, 通过  $N$  张条纹图可以解出包裹相位:

$$\varphi(u_c, v_c) = -\arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n^c(u_c, v_c) \sin \delta_n}{\sum_{n=1}^N I_n^c(u_c, v_c) \cos \delta_n}. \quad (3)$$

于是, 可以根据条纹周期  $T$  进一步解出对应的投影仪像素的横坐标  $u_p$ :

$$u_p = \varphi(u_c, v_c) \frac{T}{2\pi}. \quad (4)$$

#### 2.1.2 复杂纹理误差分析

在离焦情况下, 相机的每一个特定像素接收到的光强会受到物体点邻域内其他点反射强度的影响。此时, 相机获取的条纹图像可表示为:

$$I_n^d(u_c, v_c) = G(x, y) \otimes I_n^c(u_c, v_c) = \iint_{\Omega} G(x, y) I_n^c(u_c + x, v_c + y) dx dy, \quad (5)$$

式中:  $I_n^d(u_c, v_c)$  为相机实际获取的光强;  $\Omega$  为离焦窗口大小;  $(x, y)$  为离焦窗口中各点的坐标;  $G(x, y)$  为相机在这一点上的 PSF;  $\otimes$  表示卷积运算。在相机离焦的情况下, PSF 可用标准差为  $\sigma$  的高斯函数描述。为后续表述方便, 令:

$$K_{xy} = K(u_c, v_c, x, y) = G(x, y) r(u_c + x, v_c + y). \quad (6)$$

以横向条纹为例, 条纹沿  $x$  轴正方向变化, 有<sup>[14]</sup>:

$$\varphi'(u_c, v_c) = \arctan \frac{\iint_{\Omega} K_{xy} \sin \left[ \varphi(u_c, v_c) + \frac{2\pi x}{T} \right] dx dy}{\iint_{\Omega} K_{xy} \cos \left[ \varphi(u_c, v_c) + \frac{2\pi x}{T} \right] dx dy}. \quad (7)$$

将其与理想情况比较, 可得相位误差  $\Delta\varphi(u_c, v_c)$  如下:

$$\Delta\varphi(u_c, v_c) = \varphi'(u_c, v_c) - \varphi(u_c, v_c) = \arctan \frac{\iint_{\Omega} K_{xy} \sin \left( \frac{2\pi x}{T} \right) dx dy}{\iint_{\Omega} K_{xy} \cos \left( \frac{2\pi x}{T} \right) dx dy}. \quad (8)$$

在实际情况下, 相机的离焦范围相对于条纹周期是一个小量,  $T \gg x$ , 可得  $2\pi x/T \rightarrow 0$ 。因此, 可将上式简化为:

$$\Delta\varphi(u_c, v_c) \approx \arctan \frac{\iint_{\Omega} K_{xy} 2\pi x dx dy}{\iint_{\Omega} K_{xy} T dx dy}, \quad (9)$$

于是, 对应的投影仪坐标误差 $\Delta u_p$ 为:

$$\Delta u_p = \Delta\varphi(u_c, v_c) \frac{T}{2\pi} \approx \frac{\iint_{\Omega} K_{xy} x dx dy}{\iint_{\Omega} K_{xy} dx dy}. \quad (10)$$

图 2 为复杂纹理误差分析过程。

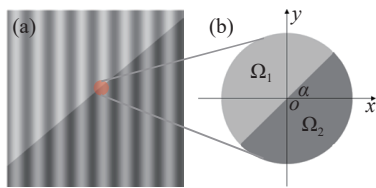


图 2 复杂纹理误差分析。(a) 被投影纹理的物体; (b) 相机像素邻域

Fig. 2 Complex texture error analysis. (a) Fringe-projected object; (b) camera pixel neighbor

如图 2 所示, 为了具体计算式 (10) 中积分的值, 将离焦区域 $\Omega$ 根据反射率分为两部分 $\Omega_1$ 与 $\Omega_2$ , 对应的反射率分别为 $r_1$ 与 $r_2$ , 条纹变化方向与物体表面纹理方向间夹角为 $\alpha$ 。由此, 可以将式 (10) 中分子与分母的积分项分别展开为两部分:

$$\Delta u_p \approx \frac{\iint_{\Omega_1} G(x, y) r_1 x dx dy + \iint_{\Omega_2} G(x, y) r_2 x dx dy}{\iint_{\Omega_1} G(x, y) r_1 dx dy + \iint_{\Omega_2} G(x, y) r_2 dx dy}. \quad (11)$$

对四部分分别积分, 若高斯函数的标准差为 $\sigma$ , 根据高斯函数的性质可得:

$$\Delta u_p = \frac{\frac{r_1 \sigma \sin \alpha}{\sqrt{2\pi}} + \frac{-r_2 \sigma \sin \alpha}{\sqrt{2\pi}}}{\frac{r_1}{2} + \frac{r_2}{2}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} \sigma \sin \alpha. \quad (12)$$

由于横纵条纹的方向间存在 $\pi/2$ 的夹角, 对于纵向条纹, 条纹变化方向为 $y$ 轴负方向, 投影仪坐标的误差为:

$$\Delta v_p = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} \sigma \sin \left( \frac{\pi}{2} + \alpha \right) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} \sigma \cos \alpha. \quad (13)$$

根据式 (12) 与式 (13),  $\Delta u_p$  与  $\Delta v_p$  间存在比例

关系:

$$\Delta u_p \cos \alpha = \Delta v_p \sin \alpha. \quad (14)$$

## 2.2 点云偏移原理与匹配方案分析

式 (14) 建立了横纵条纹测量结果间的联系。理论上, 对同一物体通过投影横纵条纹解出的点云 (横纵点云) 应完全一致。然而, 由于标定参数不可避免地存在误差, 投影横纵条纹对同一物体的测量结果并不一致。对一平板进行两次测量, 在物体与测量系统均未移动的情况下, 重建后的横纵点云之间仍存在较大的差距, 如图 3 (彩图见期刊电子版) 所示。因此, 在利用横纵点云校正复杂纹理误差前需要修正二者间的偏移。

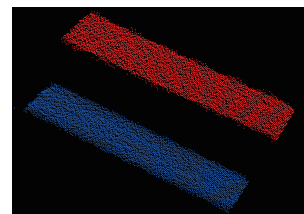


图 3 对同一平板的横纵点云重建结果

Fig. 3 Horizontal and vertical point cloud reconstruction results for the same board

在单次测量过程中, 投影横纵条纹测量同一物体生成的两组点云中, 由同一相机像素生成的点即构成点云间的一组匹配点对。将点云据此一一对应, 即可通过奇异值分解<sup>[20]</sup>(Singular Value Decomposition, SVD), 计算两个点云间的刚体变换矩阵。

首先, 分别计算两个点云的质心坐标 $C_h$ 与 $C_v$ , 并计算矩阵 $H$ 如下:

$$H = \sum_{i=1}^M (P_v^i - C_v)(P_h^i - C_h)^T, \quad (15)$$

式中:  $M$  为点云中点的总个数;  $P_h^i$  与  $P_v^i$  分别为横向与纵向点云中第  $i$  个点的坐标。

随后, 对  $H$  进行 SVD 分解得到矩阵  $U, S, V$ :

$$[U, S, V] = SVD(H). \quad (16)$$

可以得到两点云间旋转平移矩阵  $[RT]$ , 其中:

$$\begin{cases} R = VU^T \\ T = -R \times C_v + C_h \end{cases}. \quad (17)$$

根据式 (14), 横纵条纹投影生成的点云会受

到复杂纹理的影响,直接使用 SVD 会带来显著的误差。为此,本文提出了如图 4 所示的算法。

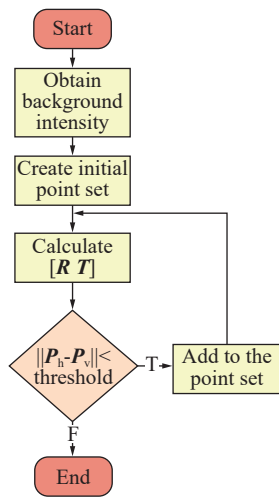


图 4 点云匹配算法流程图

Fig. 4 Flowchart of the point cloud matching algorithm

首先,通过叠加相移条纹图得到背景光强,可以确定物体上的纹理分布。随后,本文认为与纹理所在区域的距离超过一定数值的点都是未受纹理误差影响的,将其加入点对集合  $W$ 。对  $W$  中的点对使用 SVD 方法,可以得到一组变换矩阵。然而,这些点对仍会受到随机噪声等因素的影响,因此需要加入更多的点对进行匹配以降低误差。本文利用 RANSAC<sup>[21-23]</sup> 的思想进行迭代,每次在集合  $W$  之外的点对中选取变换后距离小于阈值的点

$$\begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ Z_u \\ s_c \\ s_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^c & m_{12}^c & m_{13}^c & -u_c & 0 \\ m_{21}^c & m_{22}^c & m_{23}^c & -v_c & 0 \\ m_{31}^c & m_{32}^c & m_{33}^c & -1 & 0 \\ m_{11}^p & m_{12}^p & m_{13}^p & 0 & -u_p + k \sin \alpha \\ m_{31}^p & m_{32}^p & m_{33}^p & 0 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -m_{14}^c \\ -m_{24}^c \\ -m_{34}^c \\ -m_{14}^p \\ -m_{34}^p \end{bmatrix} \quad (21)$$

同理,由纵向条纹解得投影仪纵向坐标  $v_p$ , 有:

$$\begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \\ s_c \\ s_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^c & m_{12}^c & m_{13}^c & -u_c & 0 \\ m_{21}^c & m_{22}^c & m_{23}^c & -v_c & 0 \\ m_{31}^c & m_{32}^c & m_{33}^c & -1 & 0 \\ m_{21}^p & m_{22}^p & m_{23}^p & 0 & -v_p + k \cos \alpha \\ m_{31}^p & m_{32}^p & m_{33}^p & 0 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -m_{14}^c \\ -m_{24}^c \\ -m_{34}^c \\ -m_{24}^p \\ -m_{34}^p \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中:  $s_c$  与  $s_p$  分别为相机与投影仪的尺度因子;  $P_h = [X_u, Y_u, Z_u]^T$  与  $P_v = [X_v, Y_v, Z_v]^T$  分别为根据横纵条纹解出的物体三维坐标; 投影变换矩阵  $M_c$  与  $M_p$  分别为相机与投影仪内外参的乘积, 即:

$$M_c = K_c [R_c T_c] = \begin{bmatrix} m_{11}^c & m_{12}^c & m_{13}^c & m_{14}^c \\ m_{21}^c & m_{22}^c & m_{23}^c & m_{24}^c \\ m_{31}^c & m_{32}^c & m_{33}^c & m_{34}^c \end{bmatrix} \quad (23)$$

对加入集合  $W$  并计算变换矩阵。重复上述操作直至无法加入新的点对, 此时的变换矩阵即为修正点云偏移所需的  $[RT]$  矩阵, 纵向点云中的点  $P_v$  可基于式 (18) 变换为  $P'_v$ , 从而消除其与横向点云中对应点的偏差。

$$P'_v = R \times P_v + T \quad (18)$$

### 2.3 基于双向条纹点云匹配的复杂纹理误差校正

式 (14) 已经证明, 在复杂纹理影响的区域, 横纵条纹解出的投影仪横纵坐标的误差间存在比例关系。然而, 由式 (12) 与式 (13) 直接求解误差需要获取物体表面的反射率分布与高斯函数的标准差, 其准确性难以保证。

因此, 本文选择引入参数  $k$ , 令横向相位与纵向相位的误差分别为:

$$\begin{cases} \Delta u_p = k \sin \alpha \\ \Delta v_p = k \cos \alpha \end{cases} \quad (19)$$

将式 (19) 与式 (12)、式 (13) 对比可知, 理论上:

$$k = \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2}} \quad (20)$$

对于待测物体表面上的一点  $P_w = [X, Y, Z]^T$ , 若其对应相机坐标  $(u_c, v_c)$ , 由横向条纹解得投影仪横向坐标  $u_p$ , 将  $u_p$  根据  $\Delta u_p$  进行修正, 则可根据标定参数解得修正后的三维坐标为:

$$M_p = K_p [R_p T_p] = \begin{bmatrix} m_{11}^p & m_{12}^p & m_{13}^p & m_{14}^p \\ m_{21}^p & m_{22}^p & m_{23}^p & m_{24}^p \\ m_{31}^p & m_{32}^p & m_{33}^p & m_{34}^p \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中:  $K_c$  与  $K_p$  分别为相机与投影仪的内参矩阵,  $[R_c T_c]$  与  $[R_p T_p]$  分别为相机与投影仪的外参矩阵。

根据式 (18) 校正点云偏移, 相机坐标  $(u_c, v_c)$  对应的横向三维点与纵向三维点的距离  $D$  为关于

$k$ 的函数:

$$D(k) = \|\mathbf{P}_h - \mathbf{P}_v\| \quad (25)$$

当不存在其他误差的情况下, 对应同一相机坐标的横纵点的三维坐标应一致, 即  $D = 0$ 。但是, 受随机噪声等误差的影响, 即使完全去除复杂纹理误差, 横纵点也无法重合。若以  $D = 0$  为条件, 解出的参数  $k$  的数值会呈现较大的波动性, 修正效果也很差。为此, 本文选择限定  $k$  的范围, 对每个像素搜索该范围内使函数  $D(k)$  最小时  $k$  的值, 并将由此计算横向相位修正后的对应点作为校正结果。根据式 (20),  $k < \sqrt{2/\pi}\sigma$ 。考虑到实际情况中相机离焦程度不会过大, 实验中设置  $k$  的范围为  $[-1, 1]$ 。

本文设计了一种基于双向条纹点云匹配 (Bi-directional Fringe Point Cloud Fitting, BPF) 的复杂纹理物体测量误差修正方法, 具体流程如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示。

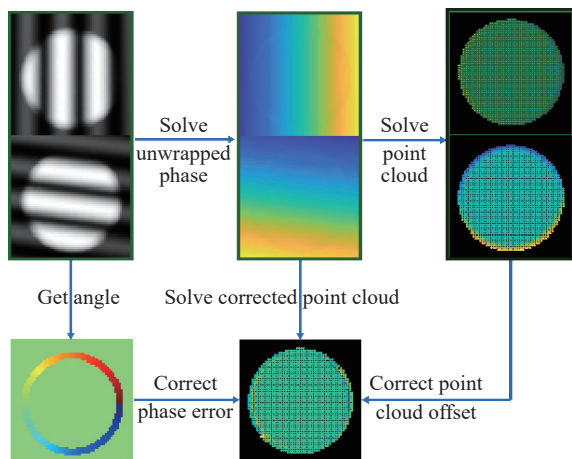


图 5 BPF 方法流程图

Fig. 5 Flowchart of BPF method

首先, 将采集的纹理图叠加, 获取不含条纹图案的白图; 随后, 利用 Sobel 算子检测边缘, 提取物体纹理角度; 然后, 由相位解出校正前的横纵点云, 根据 2.2 节方法修正点云偏移; 最后, 由纹理角度与点云信息, 根据 2.3 节方法计算校正量, 校正复杂纹理误差。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 模拟实验

首先, 本文在 Blender 中使用圆心标定板与马头模型进行了模拟实验。实验中选用八步相移法结合互补格雷码进行测量, 条纹周期为 16 个像素, 共投影条纹 30 张, 系统使用张正友标定法<sup>[24]</sup>进行标定。

模拟标定板如图 6(a) (彩图见期刊电子版) 所示, 标定板在白色圆与黑色背景的交界处产生了反射率突变, 这会导致每个白色圆圈边缘处的相位产生测量误差, 重建的三维点云也会出现相应的误差。模拟实验中, 标定板表面位于  $z = 0$  平面上, 计算重建后点云的  $z$  坐标与真值的差距即可得到重建结果的误差。图 6(b)、6(c) (彩图见期刊电子版) 为校正前的重建结果, 可以看出重建误差呈现明显的规律性。使用三角函数对横纵条纹相位误差分别进行拟合, 结果如图 7 (彩图见期刊电子版) 所示。图中横坐标为物体纹理变化方向与条纹变化方向的夹角, 纵坐标为各角度下的相位误差。图 7 展示了不同夹角情况下相位误差的变化情况。其分布符合预期, 横向条纹与纵向条纹的误差间也存在  $\pi/2$  的差距。由此可见, 第二章中对误差分布形式的分析是符合实际的。

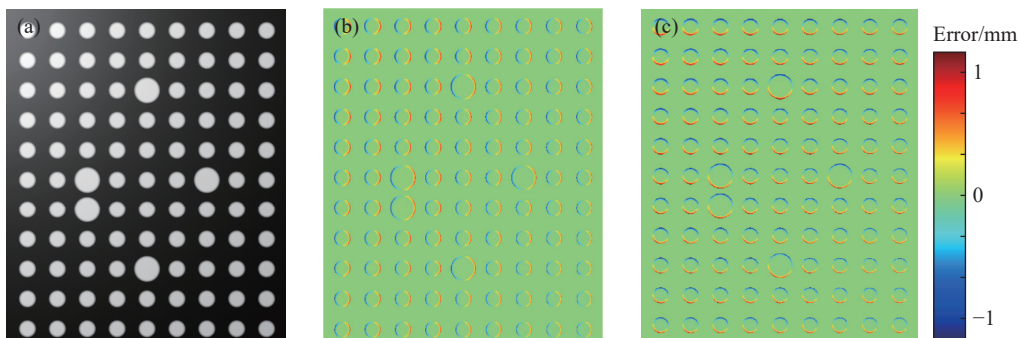


图 6 模拟标定板重建误差。(a) 模拟标定板; (b) 横向条纹重建误差; (c) 纵向条纹重建误差

Fig. 6 Reconstruction errors of the simulated calibration board. (a) Simulated calibration board; (b) horizontal fringe reconstruction error; (c) vertical fringe reconstruction error

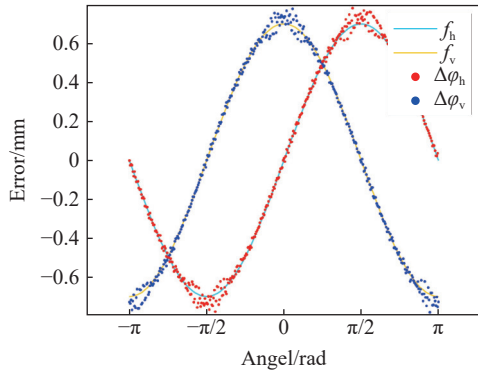


图 7 相位误差拟合结果

Fig. 7 Phase error fitting result

图 8(彩图见期刊电子版) 展示了使用几种方法重建点云的误差, 包括使用横向条纹的传统

FPP 方法 (Horizontal Fringe Projection, HFP), 基于 PSF 估计的二维误差模型方法<sup>[14]</sup> (Two-dimensional Error Model, TEM), 基于一维误差函数分析的参数计算方法<sup>[15]</sup> (Parameter Computing, PC), 基于 PSF 估计的逆傅立叶变换方法<sup>[16]</sup> (Inverse Fourier Transform, IFT), 以及本文提出的双向条纹点云匹配方法 (BPF)。为了验证去模糊方法修正复杂纹理误差的可行性, 加入了论文 [25] 提出的基于核估计 (Kernel Estimation, KE) 的去模糊方法进行对比。从图 6 中可以看出, 各个圆圈边缘处的误差分布相同。为了更明显地展示误差, 本文选择在图 8 中仅展示单个圆的分析结果。可以看出, 本文方法效果最为优异, 误差幅值明显降低。

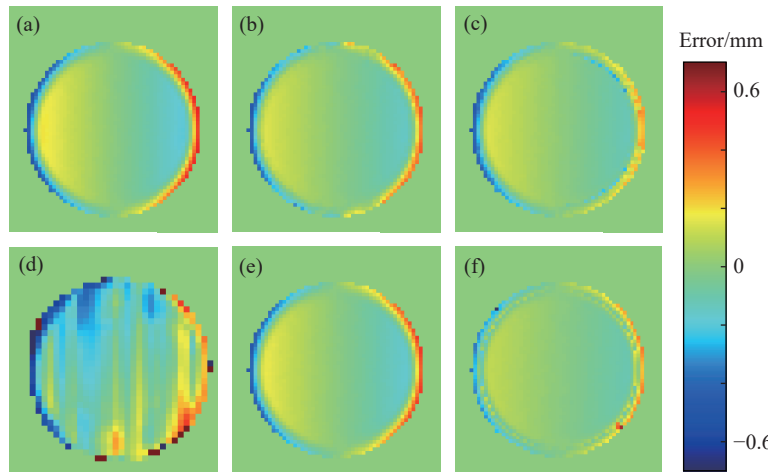


图 8 标定板重建误差。(a) HFP; (b) TEM; (c) PC; (d) KE; (e) IFT; (f) BPF

Fig. 8 Reconstruction errors of the calibration board. (a) HFP; (b) TEM; (c) PC; (d) KE; (e) IFT; (f) BPF

为了定量比较各方法的校正性能, 本文选择 MAE 与 RMSE 作为评价校正效果的性能指标, 如式 (26) 所示。计算结果如表 1 所示。可见, 本文方法拥有最优的 MAE 与 RMSE。本文方法相较于校正前方法 MAE 降低了 43.5%, RMSE 降低了 41.0%。算法 KE 的结果可以证明, 单纯去模糊无法降低复杂纹理带来的误差, 后续实验中将继续加入该方法的对比结果。

表 1 模拟标定板重建误差对比

Tab. 1 Comparison of reconstruction errors of the simulated calibration board (mm)

Methods	HFP	TEM	PC	KE	IFT	BPF
MAE	0.1083	0.0859	0.0808	0.2623	0.1065	<b>0.0612</b>
RMSE	0.1470	0.1176	0.1106	1.1835	0.1441	<b>0.0868</b>

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{\Theta} d, RMSE = \sqrt{\frac{\sum d^2}{M}}, \quad (26)$$

式中:  $\Theta$  为整个点云区域;  $M$  为点云中点的总数;  $d$  为每个点到  $z = 0$  平面的距离。

如图 9(a)(彩图见期刊电子版) 所示, 物体模型上附加了无规律的纹理, 其测量结果可以验证本方法在复杂条件下的校正效果。本文对表面没有纹理的同一个模型进行了测量, 将此测量结果作为真值, 比较各个方法的优劣。为了体现各方法对复杂面形物体的测量效果, 选取了包含模型颈部褶皱部分的区域进行对比, 如图 9(a)(彩图见期刊电子版) 中红框内区域所示。各方法对该区域的重建误差分布如图 9(b)~9(f)(彩图见期刊电子版) 所示, MAE 与 RMSE 的计算结果如表 2 所

示。相对于校正前, 本文方法的 MAE 降低了 32.9%, RMSE 降低了 31.7%。

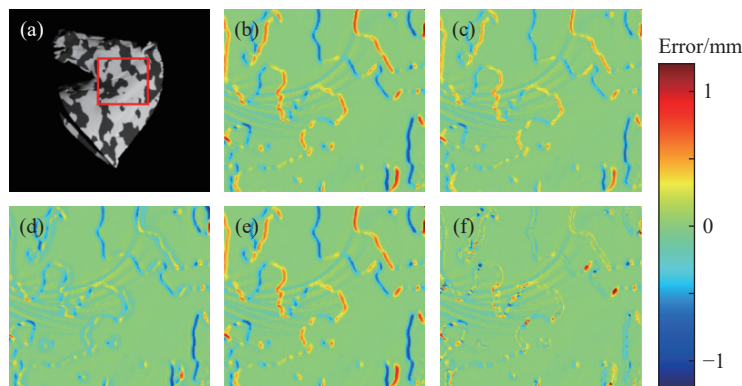


图 9 物体模型重建误差。(a) 物体及拟合区域; (b) HFP、(c) TEM、(d) PC、(e) IFT、(f) BPF 算法的重建结果

Fig. 9 Reconstruction errors of the object model. (a) Object and the fitting area. Reconstruction results of (b) HFP, (c) TEM, (d) PC, (e) IFT and (f) BPF

表 2 模拟物体模型重建误差对比

Tab. 2 Comparison of reconstruction errors of the simulated object model using different algorithms (mm)

	HFP	TEM	PC	IFT	BPF
MAE	0.0763	0.0625	0.0683	0.0738	<b>0.0512</b>
RMSE	0.1679	0.1335	0.1382	0.1613	<b>0.1147</b>

### 3.2 实物实验

为验证本方法的实用性, 搭建了实际实验装置。该实验装置由一个 DLP 投影仪 (Light-Crafter 4500, 分辨率为 1140×912) 与一个 CCD 相机 (Basler acA800-510 μm, 分辨率为 800×600) 组成。在实际实验过程中, 采用了四步相移法结合

互补格雷码的方法获取物体相位信息。其中相移周期为 16 个像素, 共投影条纹 22 张。系统同样采用张正友标定法<sup>[24]</sup>进行标定。

为了在干扰较大的实物实验中仍能取得较为科学的评价标准, 本文首先选用梯形标准块进行测量, 如图 10(彩图见期刊电子版) 所示。如图 10(a) 所示, 标准块的特定部分被涂成黑色, 与物体本身的白色形成较大的对比。对图 10(a) 中红框部分运用上述方法重建, 随即利用最小二乘法进行平面拟合, 以比较各方法的重建质量。重建误差分布如图 10(b)~10(f) 所示, MAE 与 RMSE 的计算结果如表 3 所示。相对于校正前, 本文方法的 MAE 降低了 15.6%, RMSE 降低了 39.9%。

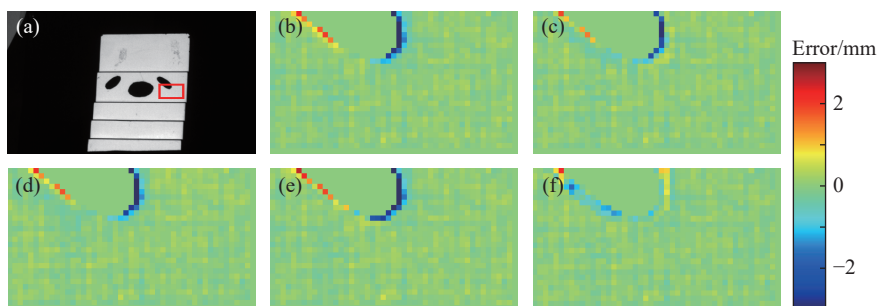


图 10 梯形块及其重建误差。(a) 梯形块及拟合区域。(b) HFP、(c) TEM、(d) PC、(e) IFT、(f) BPF 的重建误差

Fig. 10 The trapezoidal block and it's reconstruction errors. (a) Block and the fitting area. Reconstruction errors of (b) HFP, (c) TEM, (d) PC, (e) IFT and (f) BPF

模拟实验中随机噪声等误差较小, 无法验证 2.2 节中点云匹配方案与 2.3 节中对参数  $k$  范围限制的有效性。为了验证上述方案的效果, 本节进行了消融实验, 分别测试了不进行点云偏移修正

与扩大参数  $k$  取值的情况下使用 BPF 对同一区域的重建效果, 结果如图 11(彩图见期刊电子版) 所示。图 11(a) 展示了未修正点云偏移的情况下进行 BPF 校正的结果, 此时误差大幅增大。该区域

平面拟合的 MAE 与 RMSE 分别为 0.3727 mm 与 0.9686 mm, 远大于修正点云偏移后的结果。这是由于此时双向点云中对应点间的偏差主要来源于点云的整体偏移, 校正时不仅无法正确校正复杂纹理误差, 甚至会导致误差被放大。图 11(b) 展示了扩大  $k$  的取值范围到  $[-10, 10]$  时校正结果的变化, 此时平面拟合的 MAE 与 RMSE 分别为 0.1562 mm 与 0.3083 mm。虽然也有一定的校正效果, 但在部分区域校正误差显著增大, 这是由于较大的随机噪声导致算法在特定区域解出不合理的  $k$  值。

表 3 梯形块重建误差对比

Tab. 3 Comparison of reconstruction errors of the trapezoidal block using different algorithms (mm)

	HFP	TEM	PC	IFT	BPF
MAE	0.1631	0.1482	0.1540	0.1612	<b>0.1377</b>
RMSE	0.3660	0.2970	0.3511	0.3238	<b>0.2199</b>

通过对球形标准件的测量, 可以检验本方法对包含曲面的复杂纹理物体的校正效果, 如图 12(彩图见期刊电子版) 所示, 对一个直径为 50.4 mm 的标准球进行测量。与上述梯形标准

块类似, 物体部分表面被涂黑。为了体现复杂纹理误差对球直径测量的影响, 本文选择对较小的一块区域进行重建与拟合, 即图 12(a) 中方框内区域。误差分布如图 12(b)~12(f) 所示, MAE 与 RMSE 的计算结果如表 4 所示。相对于校正前, 本文方法的 MAE 降低了 33.6%, RMSE 降低了 39.1%。直径拟合误差由 10.3% 降低至 1.8%, 精度有了较大程度提高。

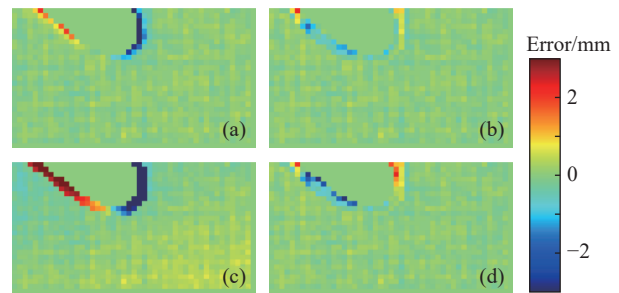


图 11 消融实验结果。(a)HFP 测量误差;(b)BPF 测量误差;(c)未修正点云偏移时 BPF 测量误差;(d)参数  $k$  搜索范围过大时 BPF 测量误差

Fig. 11 Ablation experiment results. (a) HFP measurement error; (b) BPF measurement error; (c) BPF measurement error with point cloud offset uncorrected; (d) BPF measurement error with an excessively large range of  $k$

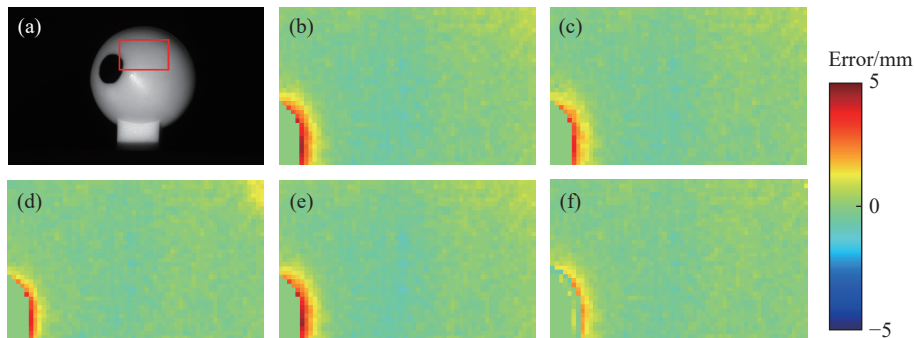


图 12 标准球及其重建误差。(a) 标准球及拟合区域。(b) HFP、(c) TEM、(d) PC、(e) IFT 及 (f) BPF 的重建误差

Fig. 12 The standard sphere and its reconstruction errors. (a) Standard sphere and the fitting area. Reconstruction errors of (b) HFP, (c) TEM, (d) PC, (e) IFT and (f) BPF

表 4 标准球重建误差对比

Tab. 4 Comparison of reconstruction errors of the standard sphere using different algorithms (mm)

	HFP	TEM	PC	IFT	BPF
MAE	0.3271	0.2805	0.2382	0.3265	<b>0.2173</b>
RMSE	0.5414	0.4531	0.4176	0.5378	<b>0.3296</b>
Diameter	45.2	47.1	47.7	46.0	<b>49.6</b>

## 4 结 论

为了解决三维测量中复杂纹理物体测量误差较大的问题, 提出了一种基于双向条纹点云匹配的校正方法。本文首先通过理论推导建立了复杂纹理物体测量时相位误差的分布模型, 揭示了物体纹理方向与相位误差的关系, 并由此提出了利

用双向条纹生成两组点云进行匹配以补偿相位误差的方法。为了降低由标定残余误差导致的点云偏移对补偿方法的影响, 计算两幅点云的变换矩阵以进行校正。为验证上述方法的有效性, 分别搭建了模拟与实际实验系统, 对表面为平面、球面与一般曲面的物体进行了测量。实验结果表明, 对实际物体, 相较传统方法, 本文方法的平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 最高可分别降低 33.6% 和 39.1%。

在不同系统上, 校正方法的效果会不尽相同。更多的相移步数能够降低噪声的影响, 降低其对校正算法的干扰; 更高的系统分辨率能够增

加点云密度, 提升点云匹配的准确性。对离焦程度与本实验环境差别较大的系统, 其参数取值范围可能不同。文献 [26] 中给出了根据单张图像估算离焦程度的方法, 后续可使用该方法开发自适应参数范围估算算法。

本文的推导假设在相机 PSF 内只存在两种不同反射率的区域, 且其边缘可看作一条直线。若一小块区域内的表面存在多种颜色, 抑或是相机离焦程度过大, 都会导致该假设与实际情况产生差异。在实物场景中, 针对纹理分布更为复杂、反射率分布范围更大的情况, 仍需要进行更深入的研究。

### 参考文献:

- [1] XU J, ZHANG S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106193.
- [2] ZUO CH, FENG SH J, HUANG L, *et al.*. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [3] 余佳杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 基于结构光视觉和光照模型的焊缝表面质量检测[J]. *中国激光*, 2022, 49(16): 1602019.
- [4] YU J J, ZHOU J P, XUE R X, *et al.*. Weld Surface quality detection based on structured light and illumination model[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(16): 1602019. (in Chinese).
- [4] 李勇, 张广汇, 马利红, 等. 条纹投影动态三维表面成像技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303005.
- [4] LI Y, ZHANG G H, MA L H, *et al.*. Review of dynamic three-dimensional surface imaging based on fringe projection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303005. (in Chinese).
- [5] LIU ZH CH, LIU X L, CAO ZH Q, *et al.*. High precision calibration for three-dimensional vision-guided robot system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(1): 624-634.
- [6] WANG Q, KIM M K. Applications of 3D point cloud data in the construction industry: a fifteen-year review from 2004 to 2018[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 39: 306-319.
- [7] 李茂月, 蔡东辰, 赵伟翔, 等. 航空叶片形貌高精度结构光扫描视点规划[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(4): 802-815.
- [7] LI M Y, CAI D CH, ZHAO W X, *et al.*. High precision structural light scanning viewpoint planning for aircraft blade morphology[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 802-815. (in Chinese).
- [8] 沈春梅, 刘凡, 朱佳乐. 基于结构光和 CT 的背部点云配准算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(22): 2210007.
- [8] SHEN CH M, LIU F, ZHU J L. Back point cloud registration algorithm based on structured light and CT[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(22): 2210007. (in Chinese).
- [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(中英文)*, 2025, 18(1): 42-52.
- [9] WANG Y, GUO J Y, LIANG J ZH, *et al.*. Structured light surface shape measurement method for highly reflective surfaces[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(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(中英文)*, 2024, 17(1): 1-18.
- [10] 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, 17(1): 1-18. (in Chinese).
- [11] 曹智睿. 基于相移条纹投影的动态 3D 测量误差补偿技术(英文)[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(1): 184-192.
- [11] CAO ZH R. Dynamic 3D measurement error compensation technology based on phase-shifting and fringe projection[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 184-192.
- [12] BLANCHARD C, ZHANG S. Removal of phase artifacts from high-contrast texture for 3D fringe projection system[J].

- Proceedings of SPIE*, 2022, 12098: 1209805.
- [13] CHEN ZH D, LI X R, WANG H R, *et al.*. Multi-dimensional information sensing of complex surfaces based on fringe projection profilometry[J]. *Optics Express*, 2023, 31(25): 41374-41390.
- [14] RAO L, DA F P. Local blur analysis and phase error correction method for fringe projection profilometry systems[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(15): 4267-4276.
- [15] WU Y X, CAI X J, ZHU J J, *et al.*. Analysis and reduction of the phase error caused by the non-impulse system psf in fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127: 105987.
- [16] HU CH P, LIU SH T, WU D, *et al.*. Phase error model and compensation method for reflectivity and distance discontinuities in fringe projection profilometry[J]. *Optics Express*, 2023, 31(3): 4405-4422.
- [17] YAO P CH, CHEN Y CH, GAI SH Y, *et al.*. Accurate 3D measurement of complex texture objects by height compensation using a dual-projector structure[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2024, 33: 3021-3030.
- [18] JUAREZ-SALAZAR R, RODRIGUEZ-REVELES G A, ESQUIVEL-HERNANDEZ S, *et al.*. Three-dimensional spatial point computation in fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 164: 107482.
- [19] GUO B J, XU Y P, ZHANG CH L, *et al.*. An optimized error compensation method for phase measurement profilometry[J]. *Photonics*, 2023, 10(9): 1036.
- [20] EGGERT D W, LORUSSO A, FISHER R B. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms[J]. *Machine Vision and Applications*, 1997, 9(5-6): 272-290.
- [21] WANG B, ZHAO ZH SH, CHEN Y, *et al.*. A novel robust point cloud fitting algorithm based on nonlinear gauss-helmert model[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1002012.
- [22] WU Y, MA W P, GONG M G, *et al.*. A novel point-matching algorithm based on fast sample consensus for image registration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(1): 43-47.
- [23] 季宇航, 宋爱国. 基于点线特征的通风管道建模与管内定位方法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(2): 272-279.  
JI Y H, SONG A G. Modeling and localization method for ventilation ducts based on point and line features[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(2): 272-279. (in Chinese).
- [24] ZHANG ZH Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [25] XU L, JIA J Y. Two-phase kernel estimation for robust motion deblurring[C]. *Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision*, Springer, 2010: 157-170.
- [26] ZHUO SH J, SIM T. Defocus map estimation from a single image[J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(9): 1852-1858.

#### 作者简介:



盖绍彦(1979—),男,山东青岛人,博士,副教授,博士生导师,2008年于东南大学自动控制系获得博士学位,主要研究方向为三维测量和三维人脸识别。E-mail: [qxxyymm@163.com](mailto:qxxyymm@163.com)