

基于双向条纹投影的复杂纹理物体三维测量

张巍^{1,2}, 陈玉翀^{1,2}, 姚鹏程^{1,2}, 盖绍彦^{1,2}, 达飞鹏^{1,2*}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 针对结构光系统中复杂纹理的反射率不连续会引起测量误差这一问题,分析并构建了其误差模型,指出了相位误差与相位梯度及灰度梯度之间的相关性,并由此提出了一种基于双向条纹投影的高精度复杂纹理物体测量方法。该方法通过投影横、纵光栅获取双向相位信息,并利用提出的映射方法将横向相位映射至纵向,与原纵向相位进行线性运算从而得到平均相位。然后,计算提取的物体纹理边缘切线和校正后相位梯度的夹角,采用相应的误差补偿算法对平均相位进行补偿,最终重建得到校正后点云。对比实验的结果表明,在同等测量效率下,所提方法能够以更高的精度重建复杂纹理物体,相较传统方法,其平均绝对误差和均方根误差最高可降低45.4%和50.1%。

关键词 测量; 三维测量; 相移技术; 双向条纹; 复杂纹理; 误差校正

中图分类号 TN247 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS240508

1 引言

条纹投影轮廓术(FPP)具有测量速度快、精度高、非接触式、成本低等优点^[1-2],近年来已在工业检测、逆向工程、生物医学等诸多领域中得到广泛应用^[3-6]。对于简单纹理物体,FPP具有优异的重建精度;但对于具有复杂纹理的物体(表面反射率变化明显的物体,如颜色较为丰富的工件、手办等),由于相机离焦,相机成像平面上每个像素实际表示的是点扩散函数(PSF)与区域内各点反射光强的卷积^[7]。在反射率突变区域,PSF范围内各点的反射率不同,相互污染,进而产生相位误差,影响最终的重建精度^[8]。为了解决这个问题,近年来,国内外众多学者基于相位补偿的思路提出了多种复杂纹理物体的三维测量方法。主要分为两类:一类是估计相机PSF分布,另一类是结合单像素成像方法(SIM)进行误差补偿。

通过估计PSF分布,能够将相位划分为正确区域和误差区域,利用临近的正确区域的相位来计算误差区域的相位补偿值。方宇耀^[9]通过拍摄黑白跳变物体图像,用最小二乘法拟合高斯曲线来估计相机的PSF,从而得到更精确的区域划分,并通过外插正确区域的相位得到误差区域的相位。Rao等^[8]基于文献^[10]的方法得到PSF分布,建立误差模型并由此利用临近正确区域的相位和相位梯度计算相位补偿值。文献^[11]通过附加一些理想的约束条件,将二维

相位误差模型简化为一维模型,并提出在反射率非退化不连续和退化不连续条件下的参数估计方法。Wu等^[12]通过拟合高斯曲线估计PSF,再利用该结果对相机捕获的图像进行反卷积。然而,此类方法依赖于PSF估计的精确度,当误差位于物体边缘附近等深度迅速变化的测量场景时,PSF估计不准确,导致利用正确区域的相位信息来补偿误差区域的方法精确度并不高。

不同于估计PSF分布方法,SIM通过重建场景反射率补偿相位误差。传统SIM通过空间光调制器调制图像并利用单像素检测器记录反射光总强度,经多次测量后反解出场景反射率^[13-17]。为了降低硬件要求,逐渐发展出并行单像素成像(PSI),该方法仅需一台投影仪和一台相机,利用投影仪投影所需图像并将相机成像平面的每个像素视作一个单像素检测器,进而重建场景反射率^[18-20]。但此类方法仍需采集数千帧图像并进行大量数据计算,于是文献^[21]引入FPP进行粗像素对应,从而将测量时间降低至传统SIM的8%。但该方法建立在相机离焦程度不大,即高斯模糊核 $\sigma < 1$ 的基础上,而通常情况下相机PSF的 $\sigma \geq 1$ ^[12]。

为解决现有方法存在的问题,本文提出了基于双向条纹投影的复杂纹理物体三维测量方法。首先分析了相机离焦下反射率突变区域的相位误差模型,该模型表明相位误差与相位梯度及灰度梯度之间存在关联

收稿日期: 2024-01-16; 修回日期: 2024-02-11; 录用日期: 2024-02-23; 网络首发日期: 2024-03-13

基金项目: 江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20192004C)、江苏省高校优势学科建设工程资助课题

通信作者: *dafp@seu.edu.cn

性。由于需要双向相位信息,提出了将横向相位映射至纵向的方法。另外,根据相位误差模型将误差区域根据角度划分为两个补偿区域,对两个区域分别提出不同的相位补偿方法。对比实验结果表明,与传统方法相比,所提方法能实现复杂纹理物体的高精度测量,平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)最高可降低 45.4% 和 50.1%。

2 基本原理

2.1 基于 FPP 的复杂纹理物体测量误差分析

图 1 为典型的 FPP 系统,包括一台工业相机(即电荷耦合器件,CCD)和一台数字光投影仪(DLP)。在测量过程中,DLP 投影一组光栅条纹至待测物体上,相机捕获被物体形状调制后的光栅图像,再通过解码、解包裹相位等操作获取被测物体的相位信息,最后利用相机、投影仪、被测物体的三角关系重建出被测物体

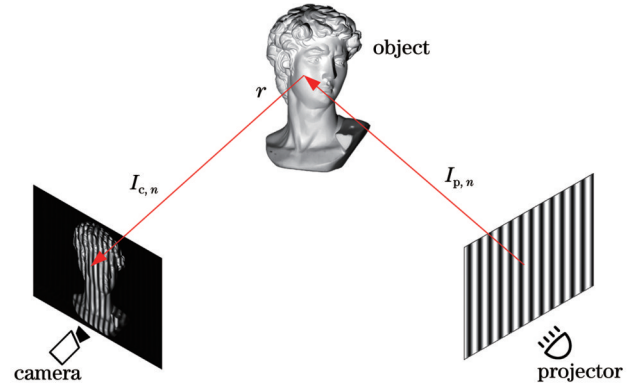


图 1 FPP 系统的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FPP system

的三维点云。在理想状态下,物体表面点、相机成像平面像素、投影仪成像平面像素一一对应。

DLP 投影的正弦条纹可表示为

$$\begin{cases} I_{p,n}(u, v) = A(u, v) + B(u, v) \cos[\phi(u, v) + \delta_n], n = 1, 2, \dots, N \\ \delta_n = 2\pi(n-1)/N \end{cases}, \quad (1)$$

式中: N 为相移总步数, $n=1, 2, \dots, N$; (u, v) 为像素点坐标; A 和 B 分别为条纹的背景强度和调制强度; ϕ 为待求的包裹相位; δ_n 为第 n 步相移条纹的相移量。

相移条纹经物体表面调制后,理想条件下相机捕

获得的光栅图像可表示为

$$I_{c,n}(u, v) = r(u, v) \times I_{p,n}(u, v), \quad (2)$$

式中: r 为物体表面的反射率。根据 N 步相移原理,理想包裹相位为

$$\phi(u, v) = -\arctan \frac{\sum_{n=1}^{n=N} I_{c,n}(u, v) \sin \delta_n}{\sum_{n=1}^{n=N} I_{c,n}(u, v) \cos \delta_n} = -\arctan \frac{\sum_{n=1}^{n=N} \{ A(u, v) \sin \delta_n + B(u, v) \sin \delta_n \cos[\phi(u, v) + \delta_n] \}}{\sum_{n=1}^{n=N} \{ A(u, v) \cos \delta_n + B(u, v) \cos \delta_n \cos[\phi(u, v) + \delta_n] \}}, \quad (3)$$

利用三角函数正交性和三角函数积化和差公式,式(3)可进一步推导为

$$\begin{aligned} \phi(u, v) &= \arctan \frac{\frac{N}{2} B(u, v) \sin \phi(u, v)}{\frac{N}{2} B(u, v) \cos \phi(u, v)} = \\ &= \arctan \frac{\sin \phi(u, v)}{\cos \phi(u, v)}. \end{aligned} \quad (4)$$

如图 2 所示,当相机离焦即具有非理想的 PSF 时,相机成像平面的一个像素不再只接收投影仪单个像素投出条纹的光强,而是接收来自物体表面上 PSF 范围内各点的反射光强。

此时相机捕获光栅图像可表示为

$$I_{g,n}(u, v) = G(i, j) \otimes I_{c,n}(u, v) = \sum_{i=-w/2}^{i=w/2} \sum_{j=-w/2}^{j=w/2} G(i, j) \times I_{c,n}(u+i, v+j), \quad (5)$$

式中: \otimes 为卷积运算; $I_{g,n}$ 为相机离焦下即实际捕获到光栅图像的灰度值; $w+1$ 为离焦窗口大小; (i, j) 表示窗口中的位置索引,为便于描述,下文省略其取值范围。 $G(i, j)$ 为相机离焦的点 PSF 函数,可用均值为 0

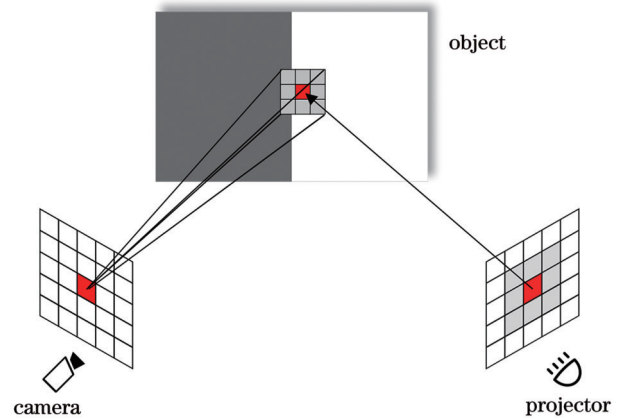


图 2 相机离焦下复杂纹理物体测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of complex texture object measurement under camera defocus

的高斯函数^[22]描述

$$G(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right). \quad (6)$$

由于相机离焦范围远小于物体与相机、投影仪的距离,可以假设一个局部正向平面,即像素点 (u, v)

受到相机离焦影响的区域可视为一个垂直于相机和 DLP 光轴的平面^[8], 于是当 DLP 投影横向往光栅时,

有 $\phi(u+i, v+j) = \phi(u, v) + 2\pi i/T$, 因此相机捕获光栅图像的灰度值 $I_{g,n}$ 可进一步推导为

$$I_{g,n}(u, v) = \sum_i \sum_j M(u, v; i, j) \times \left\{ A(u+i, v+j) + B(u+i, v+j) \cos \left[\phi(u+i, v+j) + \delta_n \right] \right\} = \sum_i \sum_j M(u, v; i, j) \times \left\{ A(u+i, v+j) + B(u+i, v+j) \cos \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} + \delta_n \right] \right\}, \quad (7)$$

式中: T 为条纹宽度。为简要描述, 后续 $M(u, v; i, j)$ 表述为 M_{ij} , 其具体形式为

$$M_{ij} = r(u+i, v+j) \times G(i, j). \quad (8)$$

于是可以解出实际包裹相位

$$\phi'(u, v) = \arctan \frac{\sum_i \sum_j M_{ij} \times \frac{N}{2} B(u+i, v+j) \sin \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} \right]}{\sum_i \sum_j M_{ij} \times \frac{N}{2} B(u+i, v+j) \cos \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} \right]}, \quad (9)$$

由于 B 表示 DLP 投影的正弦条纹的强度调制, 大小处处相等, 因此式(9)可进一步表示为

$$\phi'(u, v) = \arctan \frac{\sum_i \sum_j M_{ij} \sin \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} \right]}{\sum_i \sum_j M_{ij} \cos \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} \right]}. \quad (10)$$

根据式(4)和式(10)可求出包裹相位误差

$$\begin{aligned} \Delta\phi(u, v) &= \phi'(u, v) - \phi(u, v) = \arctan \frac{\sum_i \sum_j M_{ij} \sin \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} \right]}{\sum_i \sum_j M_{ij} \cos \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} \right]} - \arctan \frac{\sin \phi(u, v)}{\cos \phi(u, v)} = \\ &= \arctan \frac{\sum_i \sum_j \left\{ M_{ij} \sin \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} \right] \cos \phi(u, v) - M_{ij} \cos \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} \right] \sin \phi(u, v) \right\}}{\sum_i \sum_j \left\{ M_{ij} \cos \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} \right] \cos \phi(u, v) + M_{ij} \sin \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi i}{T} \right] \sin \phi(u, v) \right\}} = \\ &= \arctan \frac{\sum_i \sum_j M_{ij} \sin \frac{2\pi i}{T}}{\sum_i \sum_j M_{ij} \cos \frac{2\pi i}{T}}. \end{aligned} \quad (11)$$

其中, 由于 $\frac{2\pi i}{T} \rightarrow 0$, 于是有 $\sin \frac{2\pi i}{T} \approx \frac{2\pi i}{T}$, $\cos \frac{2\pi i}{T} \approx 1$, 因此包裹相位误差进一步推导为

$$\Delta\phi(u, v) \approx \arctan \frac{2\pi \sum_i \sum_j M_{ij} \times i}{T \sum_i \sum_j M_{ij}}. \quad (12)$$

将式(8)代入式(12), 包裹相位误差最终表示为

$$\Delta\phi(u, v) \approx \arctan \frac{2\pi \sum_i \sum_j r(u+i, v+j) G(i, j) \times i}{T \sum_i \sum_j r(u+i, v+j) G(i, j)}, \quad (13)$$

式中: $r(u+i, v+j)G(i, j)$ 项表示 $\Delta\phi$ 与灰度梯度相关; i 项表示 $\Delta\phi$ 与相位梯度相关。

采用互补格雷码^[23]的方式获取条纹阶次 k , 实际绝对相位 Φ' 表示为

$$\Phi'(u, v) = \phi'(u, v) + 2\pi k(u, v). \quad (14)$$

由于离焦范围较小, 通常不会影响条纹阶次, 因此可以忽略阶次 k 的干扰, 于是包裹相位 ϕ 的误差 $\Delta\phi$ 可推广至绝对相位 Φ 的误差 $\Delta\Phi$ 。为了避免混淆, 下文统一使用 $\Delta\Phi$ 作为相位误差。

为了获得更精确的数学模型, 进行仿真实验。

图 3(a) 为测试物体, 四周灰色部分的反射率 $r=0.3$, 中心圆形部分的反射率 $r=1.0$ 。对其采用离焦大小 $\sigma=3$ 、离焦范围 $w+1=7$ 的高斯滤波器模拟相机离焦, 离焦后的物体如图 3(d) 所示。将相移和格雷码光栅条纹逆时针旋转一定角度并投影至物体, 离焦前第一幅横向和纵向相移条纹分别如图 3(b)、(c) 所示, 离焦后的横向和纵向条纹分别如图 3(e)、(f) 所示; 分别求出离焦前和离焦后的双向绝对相位, 最终得到的横

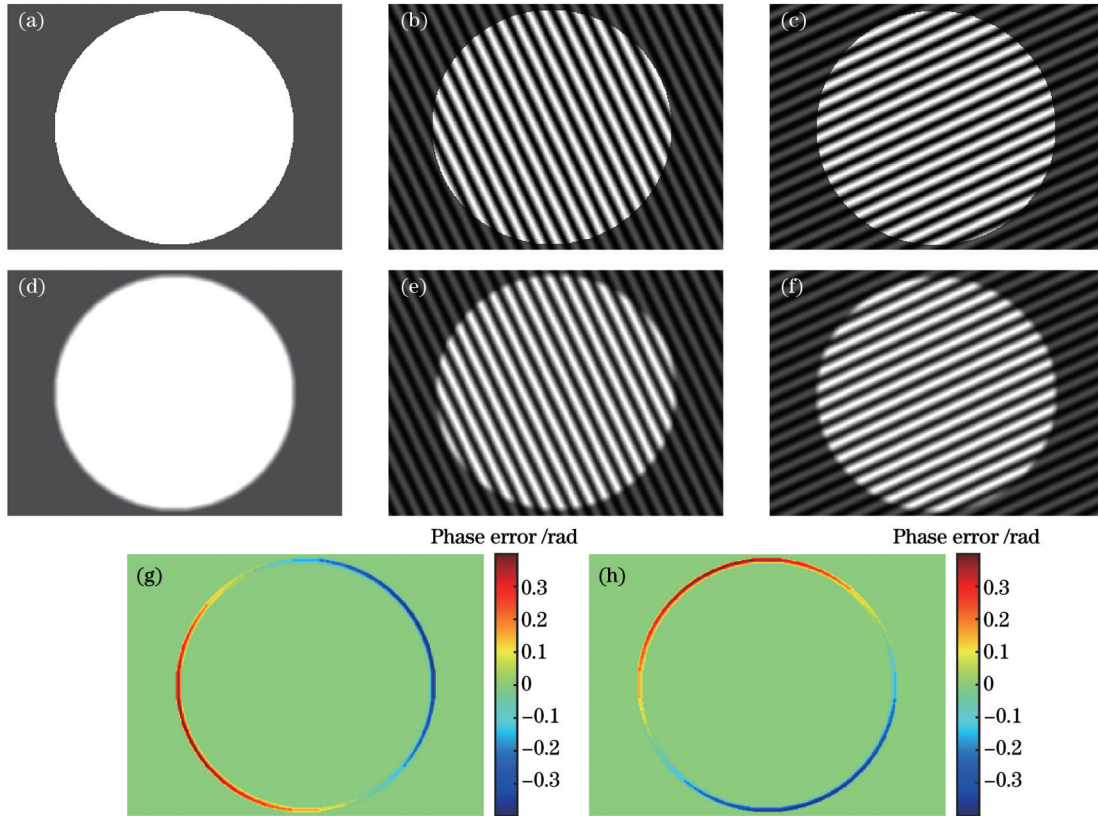


图 3 仿真实验。(a)离焦前测试物体;(b)离焦前测试物体的第一幅横向相移条纹;(c)离焦前测试物体的第一幅纵向相移条纹;(d)离焦后测试物体;(e)离焦后测试物体的第一幅横向相移条纹;(f)离焦后测试物体的第一幅纵向相移条纹;(g)横向相位误差;(h)纵向相位误差

Fig. 3 Simulation experiments. (a) Test object before defocus; (b) the first horizontal phase shift fringe of test object before defocus; (c) the first vertical phase shift fringe of test object before defocus; (d) test object after defocus; (e) the first horizontal phase shift fringe of test object after defocus; (f) the first vertical phase shift fringe of test object after defocus; (g) horizontal phase error; (h) vertical phase error

向相位误差 $\Delta\Phi_h$ 和纵向相位误差 $\Delta\Phi_v$, 分别如图 3(g)、(h) 所示, 可见相位误差与相位梯度和物体纹理边缘切线角度即灰度梯度相关。

如图 4(a) 所示, edge 表示物体纹理边缘, tangent 表示纹理边缘切线, γ ($\gamma \in [-\pi, \pi]$, 逆时针为正) 表示

切线与 $+x$ 轴的夹角(简称切线角), GdirH 和 GdirV 分别表示横向相位梯度与纵向相位梯度, θ 表示 GdirV 与 $+x$ 轴的夹角(简称相位梯度角), 于是纹理边缘切线与纵向相位梯度 GdirV 间的夹角(简称夹角) α 可描述为

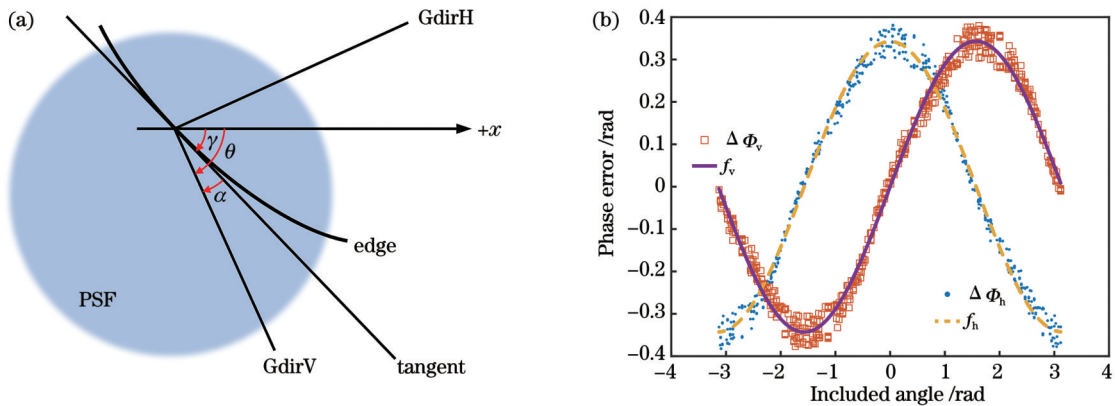


图 4 相位误差模型推导实验过程。(a)各角度关系;(b)相位误差与夹角关系

Fig. 4 Experimental process for phase error model derivation. (a) Relationship form various angles; (b) relationship between phase error and pinch angle

$$\alpha = \theta - \gamma, \alpha \in [-\pi, \pi] \quad (15)$$

将图 3 拟合的相位误差 $\Delta\Phi_h$ 、 $\Delta\Phi_v$ 与对应夹角 α 画出, 纵坐标为相位误差、横坐标为夹角, 作出如图 4(b) 所示散点图并分别拟合出两条曲线 f_h 、 f_v , 可知相位误差满足如下关系

$$\begin{cases} \Delta\Phi_h = k_0 \times \cos \alpha \\ \Delta\Phi_v = k_0 \times \sin \alpha \end{cases}, \quad (16)$$

式中: k_0 表示比例系数, 其大小与条纹宽度 T 、离焦大小 σ 、离焦范围 $w + 1$ 、物体表面反射率 r 相关。

2.2 基于双向条纹投影的复杂纹理物体三维测量方法

如图 5 所示, 根据式 (16) 画出 $\Delta\Phi_h$ 和 $\Delta\Phi_v$ 的曲线; 定义域 ($\alpha \in [-\pi, \pi]$) 可被分为两个区域, 区域 I 内 $\Delta\Phi_h$ 与 $\Delta\Phi_v$ 的符号相反, 因此校正后相位 Φ_{corr} 可直接用平均相位 Φ_{avr} 表示; 区域 II 内二者符号相同, 校正后相位 Φ_{corr} 可通过在平均相位 Φ_{avr} 基础上加或减相位偏移量 Φ_{off} 得到。平均相位 Φ_{avr} 可表示为

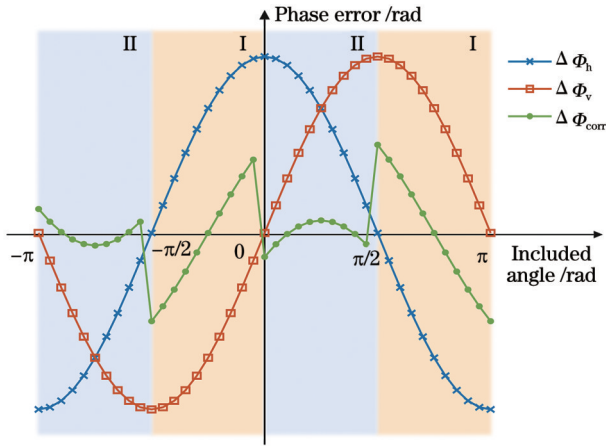


图 5 基于双向条纹投影的复杂纹理物体相位校正方法
Fig. 5 Phase correction method for complex textured objects based on bidirectional fringe projection

$$\Phi_{\text{avr}} = \frac{\Phi_h + \Phi_v}{2}, \alpha \in [-\pi, \pi], \quad (17)$$

式中: Φ_h 和 Φ_v 分别表示通过横向和纵向光栅条纹解析出的绝对相位。相位偏移量 Φ_{off} 和区域 II 校正后相位 Φ_{corr} 的表达式为

$$\begin{cases} \Phi_{\text{off}} = \frac{1}{N_o} \sum \sum \frac{|\Phi_h - \Phi_v|}{2}, \alpha \in [-\pi, \pi] \\ \Phi_{\text{corr}} = \begin{cases} \Phi_{\text{avr}} + \Phi_{\text{off}}, & \alpha \in [-\pi, -\pi/2) \\ \Phi_{\text{avr}} - \Phi_{\text{off}}, & \alpha \in (0, \pi/2) \end{cases} \end{cases}, \quad (18)$$

式中: N_o 表示像素点的数量; $|\cdot|$ 表示绝对值运算符。综上, 校正后相位表示为

$$\Phi_{\text{corr}} = \begin{cases} \Phi_{\text{avr}} + \Phi_{\text{off}}, & \alpha \in [-\pi, -\pi/2) \\ \Phi_{\text{avr}} - \Phi_{\text{off}}, & \alpha \in (0, \pi/2) \\ \Phi_{\text{avr}}, & \alpha \in [-\pi/2, 0] \cup [\pi/2, \pi] \end{cases}. \quad (19)$$

校正后相位 Φ_{corr} 的相位误差 $\Delta\Phi_{\text{corr}}$ 如图 5 所示。

利用式 (15) 计算夹角 α 的运算用到了相位梯度角, 为避免相机离焦对相位梯度角的干扰, 如图 6(a) 所示, 首先通过 sobel 算子提取物体的纹理边缘, 再利用适当的系数对其进行膨胀操作, 从而得到两个掩模 mask 1 和 mask 2。mask 1 区域称为误差区域, mask 1 在 mask 2 中的补集即 Ω , 称为正确区域。通过对临近正确区域内的相位梯度角求和取平均, 可得到误差区域内一点 P 的相位梯度角, 具体计算过程为

$$\theta(u, v) = \frac{1}{N_m} \sum_{i_m} \sum_{j_m} \theta(u + i_m, v + j_m), \quad (20)$$

$$i_m, j_m \in [-10, 10], (u + i_m, v + j_m) \in \Omega,$$

式中: (i_m, j_m) 表示求和取平均的窗口大小; N_m 表示满足 $(u + i_m, v + j_m) \in \Omega$ 的像素点的数量。点 P 在误差区域 mask 1 内。图 6(b) 为对应于图 3(d) 测试物体的校正前和后的相位梯度角误差对比。

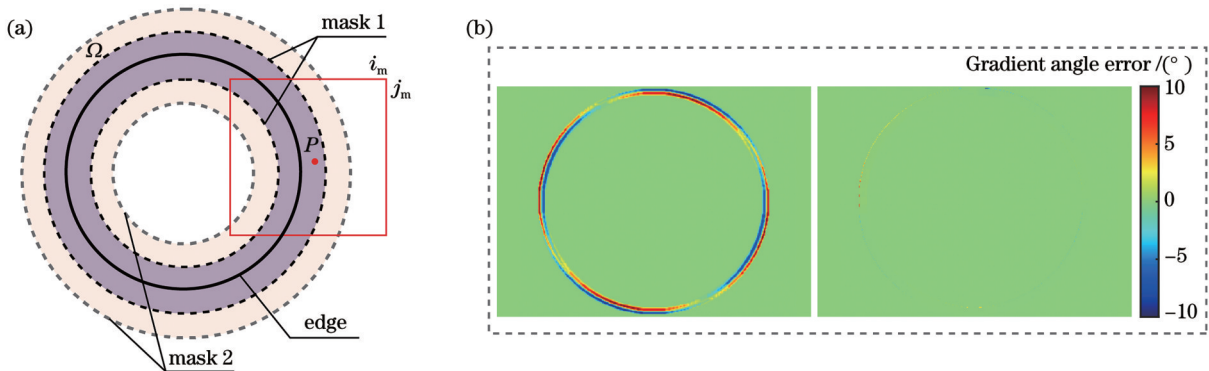


图 6 相位梯度角校正。(a) 相位梯度角校正方法; (b) 校正前后相位梯度角误差对比

Fig. 6 Phase gradient angle correction. (a) Phase gradient angle correction method; (b) comparison of phase gradient angle error before and after correction

2.3 相位映射方法

第 2.2 小节中平均相位 Φ_{avr} 利用式(17)计算得到,但由于横向相位 Φ_h 与纵向相位 Φ_v 是通过不同方向光栅条纹解析得到的,二者不能直接相加,本小节提出将横向相位映射至纵向的方法。

利用小孔成像模型,代入经张正友标定法^[24]得到的相机和 DLP 标定参数、相机点坐标、投影仪点横坐标,三维空间中一点 $P_w(X, Y, Z)$ 可求得,即

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ s_c \\ s_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{c,11} & m_{c,12} & m_{c,13} & -u_c & 0 \\ m_{c,21} & m_{c,22} & m_{c,23} & -v_c & 0 \\ m_{c,31} & m_{c,32} & m_{c,33} & -1 & 0 \\ m_{p,11} & m_{p,12} & m_{p,13} & 0 & -u_p \\ m_{p,31} & m_{p,32} & m_{p,33} & 0 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -m_{c,14} \\ -m_{c,24} \\ -m_{c,34} \\ -m_{p,14} \\ -m_{p,34} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

式中: s_c 和 s_p 分别表示相机和 DLP 的尺度因子; (u_c, v_c) 表示点 $P_w(X, Y, Z)$ 对应的相机像素 P_c 的坐标; $u_p = \Phi_h \times \frac{T}{2\pi}$, 表示对应于 $P_w(X, Y, Z)$ 的投影仪像素

$P_p(u_p, v_p)$ 的横坐标。 M_c 和 M_p 分别表示相机和 DLP 的内参与外参的乘积,即

$$\begin{cases} M_c = K_c [R_c | T_c] = \begin{bmatrix} m_{c,11} & m_{c,12} & m_{c,13} & m_{c,14} \\ m_{c,21} & m_{c,22} & m_{c,23} & m_{c,24} \\ m_{c,31} & m_{c,32} & m_{c,33} & m_{c,34} \end{bmatrix} \\ M_p = K_p [R_p | T_p] = \begin{bmatrix} m_{p,11} & m_{p,12} & m_{p,13} & m_{p,14} \\ m_{p,21} & m_{p,22} & m_{p,23} & m_{p,24} \\ m_{p,31} & m_{p,32} & m_{p,33} & m_{p,34} \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (22)$$

式中: K_c, R_c, T_c 分别表示相机的内参矩阵、旋转矩阵和平移矩阵; K_p, R_p, T_p 分别表示投影仪的内参矩阵、旋转矩阵和平移矩阵。

求得三维点云和尺度因子后,便可将投影仪点 $P_p(u_p, v_p)$ 的横坐标 u_p 映射为纵坐标,映射后的纵坐标为

$$v_{pFh} = \frac{1}{s_p} \times (m_{p,21}X + m_{p,22}Y + m_{p,23}Z + m_{p,24}). \quad (23)$$

综上,相位映射方法的流程如图 7 所示。

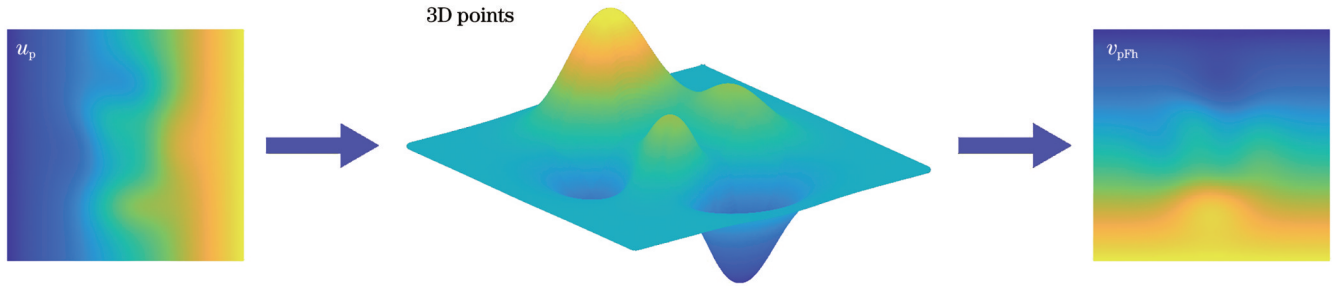


图 7 相位映射方法

Fig. 7 Phase mapping method

然而,计算过程中由于系统的标定参数存在误差,所以 v_{pFh} 与理想映射结果间存在固有偏差,于是修正后的 v'_{pFh} 可描述为

$$v'_{pFh} = v_{pFh} - \frac{1}{N_o} \sum \sum (v_{pFh} - v_p), \quad (24)$$

式中: $v_p = \Phi_v \times \frac{T}{2\pi}$, 表示对应于 $P_w(X, Y, Z)$ 的投影仪像素 $P_p(u_p, v_p)$ 的纵坐标。于是式(19)中的平均相位和相位偏移量应为

$$\begin{cases} \Phi'_{off} = \frac{1}{N_o} \sum \sum \frac{|\Phi'_{vFh} - \Phi_v|}{2}, & \alpha \in [-\pi, \pi] \\ \Phi'_{avr} = \frac{\Phi'_{vFh} + \Phi_v}{2}, & \alpha \in [-\pi, \pi] \end{cases}, \quad (25)$$

式中: $\Phi'_{vFh} = v'_{pFh} \times T/(2\pi)$, 表示由 v'_{pFh} 计算出的纵向相位。校正后相位最终表示为

$$\Phi'_{corr} = \begin{cases} \Phi'_{avr} + \Phi'_{off}, & \alpha \in [-\pi, -\pi/2] \\ \Phi'_{avr} - \Phi'_{off}, & \alpha \in (0, \pi/2) \\ \Phi'_{avr}, & \alpha \in [-\pi/2, 0] \cup [\pi/2, \pi] \end{cases}. \quad (26)$$

由此可计算出校正后的三维点云

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ s_c \\ s_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{c,11} & m_{c,12} & m_{c,13} & -u_c & 0 \\ m_{c,21} & m_{c,22} & m_{c,23} & -v_c & 0 \\ m_{c,31} & m_{c,32} & m_{c,33} & -1 & 0 \\ m_{p,21} & m_{p,22} & m_{p,23} & 0 & -v'_p \\ m_{p,31} & m_{p,32} & m_{p,33} & 0 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -m_{c,14} \\ -m_{c,24} \\ -m_{c,34} \\ -m_{p,24} \\ -m_{p,34} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

式中: $v'_p = \Phi'_{corr} \times T/(2\pi)$; (X', Y', Z') 表示校正后的三维点云。

综上,所提基于双向条纹投影的复杂纹理物体三维测量方法具体步骤如下:

- 1) 投影纵向、横向光栅条纹,分别解出横向绝对相位 Φ_h 和纵向绝对相位 Φ_v ,并利用式(21)得到物体待校正三维点云;
- 2) 将待校正三维点云代入式(23),得到初步映射结果 v_{pFh} ,通过式(24)进一步修正,得到 v'_{pFh} ,从而将横向绝对相位 Φ_h 映射到纵向即 Φ'_{vFh} ;
- 3) 提取物体纹理边缘并求出切线角 γ 和相位梯度角 θ ,通过式(20)校正相位梯度角,从而通过式(15)计算夹角 α ;
- 4) 根据 α 划分校正区域,由式(26)得到校正后绝对相位 Φ'_{corr} ,最终通过式(27)得到校正后的三维点云。

3 实验与分析

为验证所提方法的有效性,搭建了如图 8 所示的 FPP 三维测量系统,包含一台数字投影仪(DLP LightCrafter 4500,分辨率为 1140×912)和一台工业相机(Basler acA800-510 μm ,分辨率为 800×600 ,并附加一个焦距为 $4 \sim 12 \text{ mm}$ 的镜头)。采用四步相移

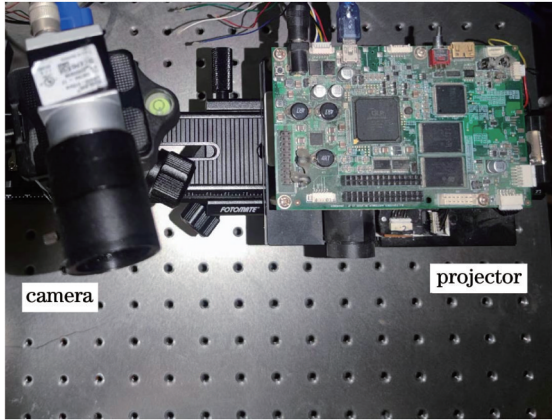


图 8 实验装置图

Fig. 8 Experimental setup diagram

(周期为 16 pixel)加互补格雷码的方式获得相位信息,共需 $(4 + 7) \times 2 = 22$ 幅投影条纹。为了保证对比实验的客观性,所有实验条件均保持一致。首先测量了具有反射率跳变特性的平面物体(圆形标定板和卡套),并通过平面拟合的 MAE 和 RMSE 定量表述测量精度;然后测量了具有复杂纹理的曲面物体花瓶,证明所提方法的泛用性;最后测量了一纯白标准梯形块,并在其表面绘制纹理后再次测量,通过绘制纹理前后的点云计算 MAE 和 RMSE,定量表述测量精度。

3.1 圆形标定板测量

首先测量圆形标定板,该标定板从黑色底色跳变至白色圆形区域时出现反射率突变,为重点关注反射率突变而降低噪声对重建结果的影响,仅重建强度噪声影响较小的白色圆形区域。图 9(a)、(b)分别为系统采集到的第一幅横向和纵向相移图;图 9(c)、(d)分别为通过横向光栅条纹解析得到的横向相位,以及根据 2.3 节原理将其转换至纵向的相位图;图 9(e)为转换至纵向的相位与原纵向相位(通过解析纵向光栅条纹得到)之差,矩形框内的放大图证明二者的误差存在符号相同区域和符号相反区域,与 2.1 节分析一致;图 9(f)为使用所提校正方法得到的校正后相位。

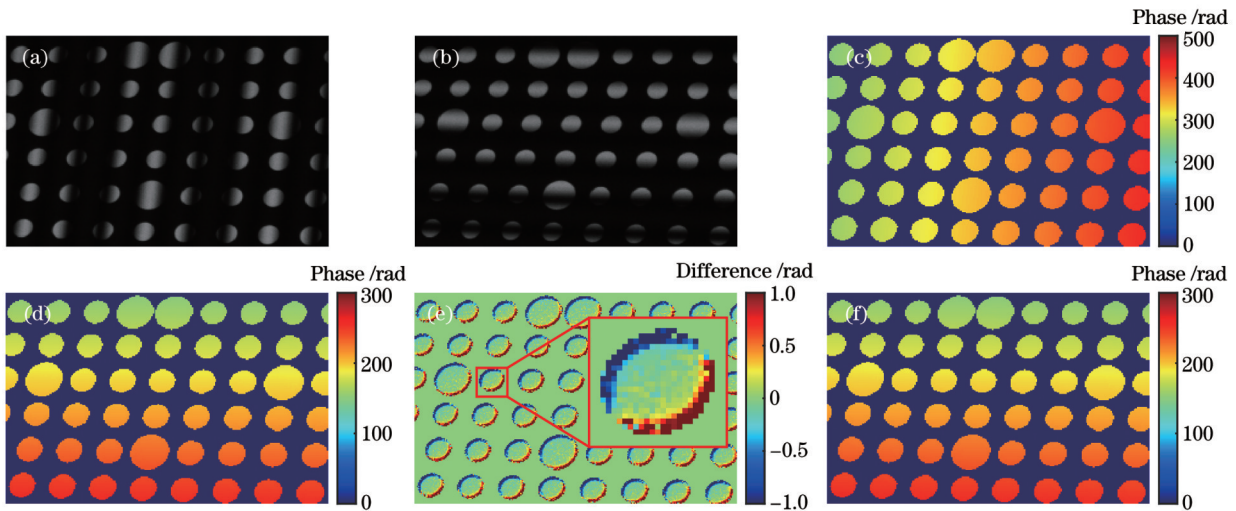


图 9 圆形标定板测量过程。(a)采集的横向光栅图像;(b)采集的纵向光栅图像;(c)原始横向相位;(d)转换至纵向的相位;(e)转换至纵向的相位与原纵向相位之差;(f)校正后相位

Fig. 9 Measurement process of circular calibration plate. (a) Horizontal fringe image captured; (b) vertical fringe image captured; (c) original horizontal phase; (d) phase converted to vertical direction; (e) difference between phase converted to vertical direction and original vertical phase; (f) corrected phase

图 10 为标定板重建误差分布图,图 10(a)、(b)分别为横向传统 FPP (TFH) 方法和纵向传统 FPP (TFV) 方法得到的误差分布,即投影横向光栅和纵向光栅使用传统 FPP 方法得到的误差分布,可见误差分布与相位梯度方向和物体纹理边缘切线方向相关;由于 TFH 方法得到的误差更小,标定板测量的对比方法都基于 TFH 实现。考虑到重复投影能够抑制随机噪声,且在一定程度上降低误差,因此为了保证投影条纹

数量与所提方法相同,重复投影两次横向光栅 (TFReH),其误差分布如图 10(c) 所示。图 10(d) 为采用文献[8]方法得到的误差分布,该方法同样也使用了两次重复投影。图 10(e) 为使用所提方法得到的误差分布,重建效果最佳。为了定量分析,对重建后的点云利用最小二乘法进行平面拟合,并利用式(28)分别计算平面拟合的 MAE 和 RMSE,计算结果如表 1 所示。相较于 TFH 和 TFV,所提方法的 MAE 分别降低

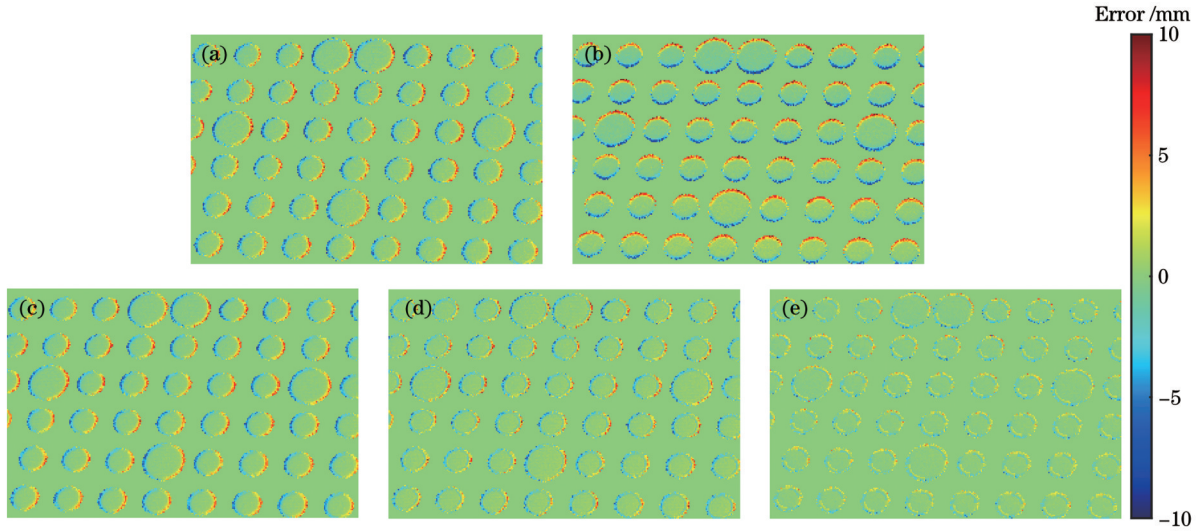


图 10 圆形标定板误差分布。(a) TFH;(b) TFV;(c) TFReH;(d)文献[8]方法;(e)所提方法

Fig. 10 Error distribution of circular calibration plate. (a) TFH; (b) TFV; (c) TFReH; (d) Ref. [8] method; (e) the proposed method

表 1 不同方法结果对比

Table 1 Comparison of results of different methods unit: mm

Method	TFH	TFV	TFReH	Ref. [8]	Ours
MAE	1.3583	1.6171	1.3054	1.0477	0.7127
RMSE	2.2202	2.6672	2.1061	1.7194	1.1771

47.5% 和 55.9%, RMSE 分别降低 47.0% 和 55.9%; 在投影条纹数量相同条件下, 无论是 MAE 还是 RMSE, 所提方法得到的均是最优值, 其 MAE 比 TFReH 方法的降低 45.4%, 比文献[8]方法的降低 32.0%; RMSE 比 TFReH 的降低 44.1%, 比文献[8]方法的降低 31.5%。

$$\begin{cases} V_{MAE} = \frac{1}{N_p} \sum_{i_p=1}^{i_p=N_p} d_{i_p} \\ V_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i_p=1}^{i_p=N_p} d_{i_p}^2}{N_p}} \end{cases}, \quad (28)$$

式中: V_{MAE} 和 V_{RMSE} 分别表示 MAE 和 RMSE 的值; N_p 表示重建的点的数量; d_{i_p} 表示重建点与拟合平面上对应点的深度偏差。

3.2 卡套测量

卡套测量结果如图 11 所示, 该卡套的纹理比圆形标定板的更复杂, 图 11(a) 矩形框部分的各方法误差分布如图 11(b)~(f) 所示。表 2 为该卡套平面拟合的 MAE 和 RMSE, 可以观察到 TFV 误差小于 TFH 误差, 因此保证投影条纹数量一致时, 图 11(d) 所示 TFReV 方法的重建误差分布。为了更细致地对比各方法, 将图 12(a) 卡套上一条线段的误差绘制于图 12(b), 由于误差与条纹方向相关, 这里仅绘制使用了纵向光栅的 TFV、TFReV、文献[8]方法以及所提方法的误差分布。该条线段覆盖了白色身体-黑色眉毛-白色身体-黑色左眼-白色身体-黑色右眼-白

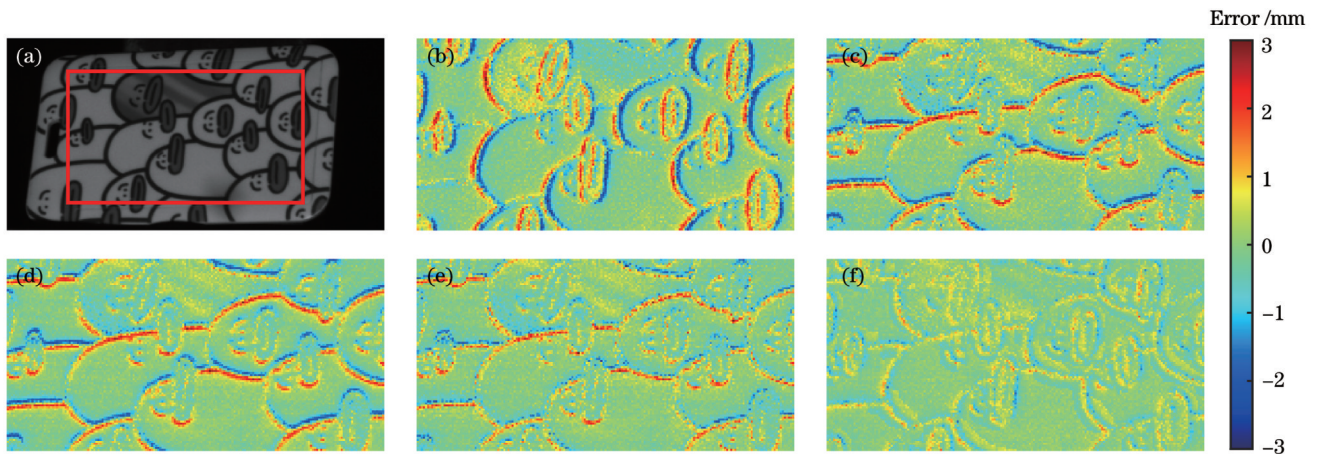


图 11 卡套测量结果。(a)卡套图像;(b) TFH 的误差分布;(c) TFV 的误差分布;(d) TFReV 的误差分布;(e)文献[8]方法的误差分布;(f)本文方法的误差分布

Fig. 11 Card holder measurement results. (a) Card holder image; (b) error distribution of TFH; (c) error distribution of TFV; (d) error distribution of TFReV; (e) error distribution of Ref. [8] method; (f) error distribution of the proposed method

表 2 不同方法结果对比

Table 2 Comparison of results of different methods

Method	TFH	TFV	TFReV	Ref. [8]	Ours
MAE	0.5122	0.4726	0.4368	0.3798	0.2920
RMSE	0.7309	0.6777	0.6396	0.5521	0.3932

unit: mm

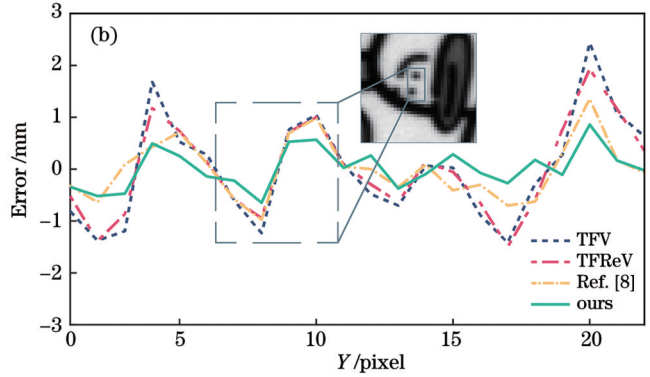
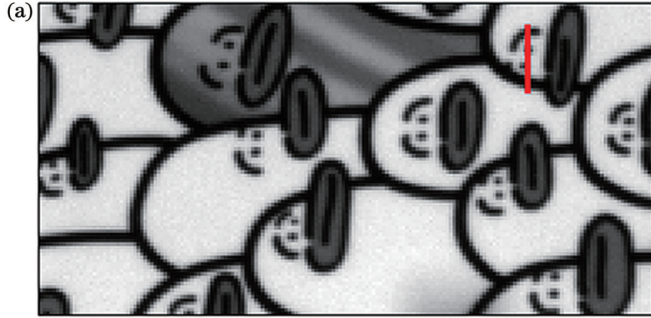


图 12 卡套误差一维截面对比。(a)卡套图像;(b)各方法对比

Fig. 12 Comparison of one-dimensional cross-section for error of card holder. (a) Card holder image; (b) comparison of various methods

平面拟合的 MAE、RMSE 如表 2 所示。所提方法较 TFH、TFV 方法, MAE 分别降低 43.0% 和 38.2%, RMSE 分别降低 46.2% 和 42.0%; 在使用相同条纹数量即投影效率相同的情况下, 所提方法的 MAE 较 TFReV 和文献 [8] 方法分别降低 33.2% 和 23.1%, RMSE 分别降低 38.5% 和 28.8%。

3.3 花瓶测量

为验证所提方法的泛用性, 测量一个具有复杂纹理且为曲面的花瓶, 图 13(a) 矩形区域对应的点云如图 13(b)~(f) 所示, 能够明显观察到, 文献 [8] 方法虽然较 THReV 方法在精度上有一定提升, 但在图 13(e) 矩形区域内仍有明显高度跳变, 而所提方法得到的点云更加平滑, 重建误差更低。

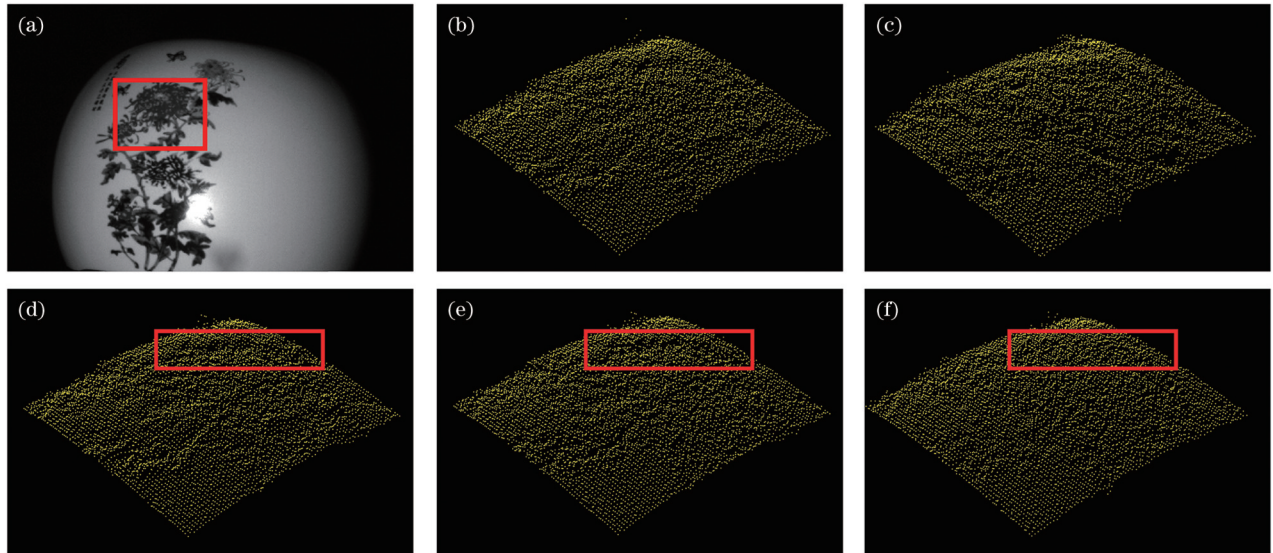


图 13 花瓶测量结果。(a)花瓶图像;(b) TFH 的点云;(c) TFV 的点云;(d) TFReH 的点云;(e) 文献 [8] 方法的点云;(f) 所提方法的点云

Fig. 13 Vase measurement results. (a) Vase image; (b) point cloud of TFH; (c) point cloud of TFV; (d) point cloud of TFReH; (e) point cloud of Ref. [8] method; (f) point cloud of the proposed method

3.4 标准梯形块测量

为更客观分析测量结果, 对同一物体在同一位

姿下绘制纹理前后的不同状态进行测量。图 14 为一标准梯形块, 图 14(a) 为表面绘制纹理前的梯形块,

图 14(b)为绘制纹理后的梯形块,将绘制纹理前重建的点云作为真值,计算绘制纹理后重建的点云与其对应点的深度偏差,作为点云误差。对图 14(b)中矩形区域采用不同校正方法优化,并计算各重建点云的

MAE 和 RMSE。结果如表 3 所示,由于无论 MAE 还是 RMSE,TFH 方法得到的值均小于 TFV,因此重复投影时采用 TFReH 方法,各方法的误差分布如图 15 所示,可以说明所提方法重建精度最高。

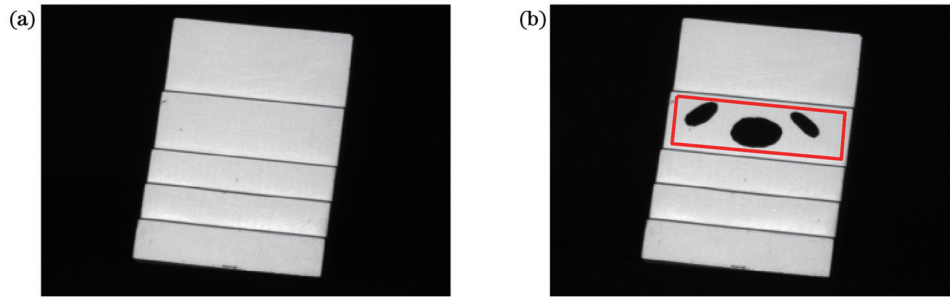


图 14 标准梯形块。(a)原梯形块;(b)绘制纹理后的梯形块
Fig. 14 Standard step block. (a) Initial step block; (b) step block with texture

表 3 不同方法结果对比
Table 3 Comparison of results of different methods

Method	TFH	TFV	TFReH	Ref. [8]	Ours
MAE	0.4152	0.5148	0.3956	0.3205	0.2246
RMSE	1.0082	1.2866	0.9954	0.7922	0.4965

unit: mm

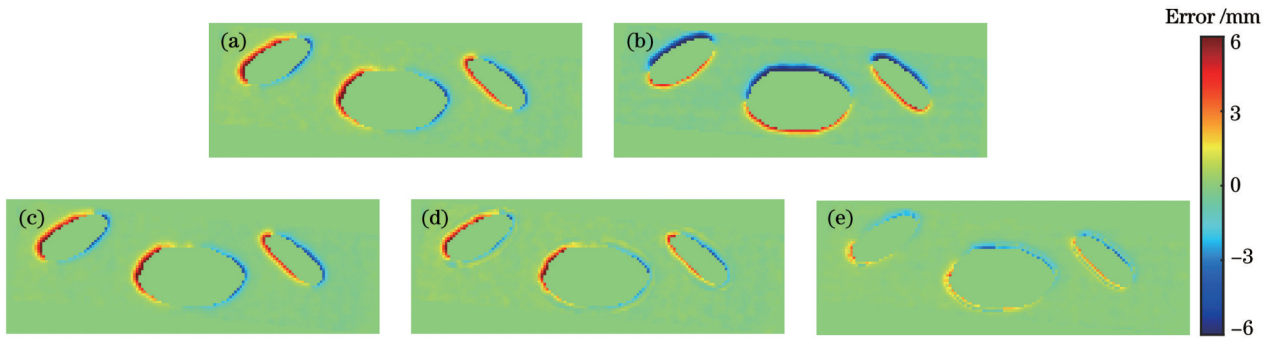


图 15 标准梯形块误差分布。(a) TFH;(b) TFV;(c) TFReH;(d)文献[8]方法;(e)所提方法
Fig. 15 Error distribution of step block. (a) TFH; (b) TFV; (c) TFReH; (d) Ref. [8] method; (e) the proposed method

利用绘制纹理前重建的点云作为真值,计算各校正方法得到的点云的 MAE 和 RMSE,结果如表 3 所示。与 TFH 和 TFV 相比,所提方法的 MAE 分别降低 45.9% 和 56.4%,RMSE 分别降低 50.8% 和 61.4%;在投影效率相同情况下,所提方法的 MAE 较 TFReH 方法和文献[8]方法分别降低 43.2% 和 29.9%,RMSE 分别降低 50.1% 和 37.3%,优化效果明显。

4 结 论

为解决传统 FPP 系统测量复杂纹理物体精度低的问题,提出了一种基于双向条纹投影的复杂纹理物体三维测量方法。首先建立了相机离焦下反射率突变区域的相位误差模型,该模型表明相位误差与相位梯度和灰度梯度相关,由此提出利用双向条纹根据角度分区补偿误差的方法;由于需利用双向相位信息,在此基础上又提出将横向相位映射至纵向的方法。为验

证所提方法的有效性,搭建了 FPP 系统,对平面和非平面的多种物体进行测量并与现有方法对比。实验结果表明,在同等测量效率下,所提出方法能够以更高精度重建复杂纹理物体,相较传统方法,所提方法的 MAE 和 RMSE 最高可降低 45.4% 和 50.1%。

参 考 文 献

- [1] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are?[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [2] 丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070003.
Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, et al. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070003.
- [3] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 109: 23-59.
- [4] 夏晨旭, 郝群, 张一鸣, 等. 基于结构光投影三维重建的人脸特征检测[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(22): 2211004.
Xia C X, Hao Q, Zhang Y M, et al. Face feature detection

- based on structured light projection three-dimensional reconstruction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 50(22): 2211004.
- [5] Feng S J, Xiao Y L, Yin W, et al. Fringe-pattern analysis with ensemble deep learning[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(3): 036010.
- [6] 达飞鹏, 盖绍彦. 光栅投影三维精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Da F P, Gai S Y. Fringe projection 3D precision measurement [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [7] 赵立伟, 达飞鹏, 郑东亮. 离焦投影三维测量的二值光栅生成方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0812005.
Zhao L W, Da F P, Zheng D L. Method for binary grating generation using defocused projection for three-dimensional measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812005.
- [8] 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.
- [9] 方宇耀. 结构光三维成像方法的不连续区域误差补偿研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 17-23.
Fang Y Y. Research on discontinuous area error compensation of structured light 3D imaging method[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020: 17-23.
- [10] Joshi N, Szeliski R, Kriegman D J. PSF estimation using sharp edge prediction[C]//2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [11] Hu C P, Liu S 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.
- [12] 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.
- [13] 翁嘉文, 欧阳浩艺, 杨初平. 基于振幅空间调制条纹投影的单像素成像[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1511003.
Weng J W, Ouyang H Y, Yang C P. Single pixel imaging based on fringe projection with amplitude spatial modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1511003.
- [14] 赵梓栋, 杨照华, 余远金. 单像素成像技术研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1917001.
Zhao Z D, Yang Z H, Yu Y J. Research progress of single pixel imaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1917001.
- [15] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 13-20.
- [16] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G A, et al. Fast Fourier single-pixel imaging via binary illumination[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 12029.
- [17] Lu T A, Qiu Z H, Zhang Z B, et al. Comprehensive comparison of single-pixel imaging methods[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106301.
- [18] Ma Y Y, Yin Y K, Jiang S, et al. Single pixel 3D imaging with phase-shifting fringe projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106532.
- [19] Wang Y F, Zhao H J, Jiang H Z, et al. Paraxial 3D shape measurement using parallel single-pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30543-30557.
- [20] Jiang H Z, Li Y X, Zhao H J, et al. Parallel single-pixel imaging: a general method for direct-global separation and 3D shape reconstruction under strong global illumination[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2021, 129(4): 1060-1086.
- [21] Lü N Q, Yu H T, Xu X Y, et al. Structured light 3-D sensing for scenes with discontinuous reflectivity: error removal based on scene reconstruction and normalization[J]. *Optics Express*, 2023, 31(12): 20134-20149.
- [22] Blanchard C, Zhang S. Removal of phase artifacts from high-contrast texture for 3D fringe projection system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12098: 1209805.
- [23] Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, et al. 3-D shape measurement based on complementary Gray-code light[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(4): 574-579.
- [24] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE Press, 2002: 666-673.

Three-Dimensional Measurement of Complex Textured Objects Based on Bidirectional Fringe Projection

Zhang Wei^{1,2}, Chen Yuchong^{1,2}, Yao Pengcheng^{1,2}, Gai Shaoyan^{1,2}, Da Feipeng^{1,2*}

¹School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

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

Abstract

Objective Fringe projection profilometry (FPP) has been widely adopted in numerous fields recently, owing to its advantages such as rapid measurement speed, high precision, non-contact, and cost-effectiveness. However, for objects with complex textures, the camera defocus, which is unavoidable, implies that each pixel on the imaging plane of the camera essentially represents the convolution of the point spread function (PSF) and the reflected light intensity from each point within the region. In regions where reflectivity changes abruptly, diverse reflectivities are displayed by points within the range of the PSF. This leads to cross-contamination, resulting in subsequent phase errors that ultimately impact the final reconstruction accuracy. Within the PSF range, due to the different reflectivity of each point in the area of reflectivity

mutation, the reflected light at each point contaminates each other after camera defocus, resulting in phase errors that ultimately impact the final reconstruction accuracy. Conventional solutions are principally divided into two categories: One approach is to estimate the PSF distribution by dividing the phase into correct and erroneous regions and compensating for the erroneous regions using the adjacent correct regions. However, this approach relies heavily on the accuracy of the PSF estimation. The other approach incorporates the single-pixel imaging method (SIM) for error compensation, but this method is inefficient in terms of measurements and fails to accommodate a high degree of camera defocus. To address these issues, we propose a three-dimensional (3D) measurement method for complex textured objects based on bidirectional fringe projection, and a structured light 3D measurement system has been established. The results of the comparison experiments demonstrate that the proposed method can reconstruct complex textured objects with a higher level of precision under the same measurement efficiency.

Methods In our work, we proposed a 3D measurement of complex textured objects based on bidirectional fringe projection to reduce the reconstruction errors caused by abrupt reflectivity changes of complex textures. A phase error model of the reflectivity mutation region under camera defocus was first built by theoretical analysis and simulation experiments. The model pointed out the correlation among the phase error, phase gradient, and gray gradient. Accordingly, a high-precision measurement methodology for complex textured objects based on bidirectional fringe projection was proposed. The method obtained bidirectional phase information by projecting the horizontal and vertical fringes and mapped the horizontal phase to the vertical direction using the proposed mapping method, which was linearly operated with the original vertical phase to obtain the average phase. Subsequently, the angle between the tangent line of the extracted texture edges of the object and the rectified phase gradient was computed, and the corresponding error compensation algorithm was used to process the average phase. Finally, the corrected point cloud was obtained by reconstruction.

Results and Discussions The proposed method in this paper is compared with the horizontal conventional FPP method, the vertical conventional FPP method, and the existing method (Rao) of compensating for the phase error by estimating the PSF distribution, respectively. To ensure consistent measurement efficiency, the comparison methods are repeatedly projected. To quantitatively articulate the measurement accuracy for planar objects, such as the calibration plate and the card holder, we compute the mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) by planar fit. The measurement results of the calibration plate (Fig. 10 and Table 1) show that the proposed method has the highest reconstruction accuracy, with 45.4% and 32.0% reduction in MAE and 44.1% and 31.5% reduction in RMSE compared to the traditional repeated projection and Rao's method, respectively. The measurement results of the card holder (Figs. 11–12 and Table 2) demonstrate that the proposed method reconstructs optimally and performs the best at the detailed texture, reducing the MAE by 33.2% and 23.1% and the RMSE by 38.5% and 28.8% compared to the traditional repeated projection method and Rao's method, respectively. To prove the generalizability of our method, a curved object with complex texture, such as a vase, is measured, and the point clouds (Fig. 13) show that the reconstruction result by using this method is the smoothest, or in other words, it has the highest reconstruction accuracy. In order to describe the effectiveness of the proposed method more objectively, two measurements are made on a pure white standard step block, and a black texture is drawn on its surface during the second measurement. The MAE and RMSE of the point cloud obtained from the second measurement are calculated by taking the reconstructed point cloud before drawing the texture as the ground truth. The measurement results (Fig. 15 and Table 3) indicate that the proposed method has the highest reconstruction accuracy, with 43.2% and 29.9% reduction in MAE and 50.1% and 37.3% reduction in RMSE compared to the traditional repeated projection method and Rao's method, respectively.

Conclusions In response to the challenge of measurement errors resulting from discontinuous reflectivity in complex textures within the structured light system, we propose a 3D measurement method of complex textured objects based on bidirectional fringe projection. In this paper, a phase error model for the reflectivity mutation area under camera defocus is initially established, which indicates that the phase error is associated with both the phase gradient and gray gradient. Consequently, a method is proposed, which uses bidirectional fringe to compensate for the error in differing regions according to their angles. Given the necessity to employ bidirectional phase information, another method is proposed, which maps the horizontal phase to the vertical direction. In order to verify the effectiveness of the proposed method, an FPP system is built to measure multiple complex textured objects on both flat and curved surfaces, and the proposed method is compared with other existing methods. The results of the comparison experiments demonstrate that the proposed method can reconstruct complex textured objects with a higher level of precision under the same measurement efficiency. The MAE and RMSE of the proposed method are reduced by up to 45.4% and 50.1%, respectively.

Key words measurement; three-dimensional measurement; phase-shifting technology; bidirectional fringe; complex textures; error correction