

基于弦分布与频谱分析的相位误差校正

黄宏志 童陈恩 许肇波 张磊 蔡柏林

Phase error correction based on chord distribution and spectral analysis

HUANG Hongzhi, TONG Chen'en, XU Zhaobo, ZHANG Lei, CAI Bolin

引用本文:

黄宏志, 童陈恩, 许肇波, 等. 基于弦分布与频谱分析的相位误差校正[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1429–1437. DOI: 10.5768/JAO202546.0603001

HUANG Hongzhi, TONG Chen'en, XU Zhaobo, et al. Phase error correction based on chord distribution and spectral analysis[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1429–1437. DOI: 10.5768/JAO202546.0603001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0603001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

相位编码条纹投影轮廓术的相位展开误差校正方法

Phase unwrapping errors correction for phase-encoding based on fringe projection profilometry

应用光学. 2020, 41(5): 978–983 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0502007>

基于傅里叶变换频谱分析的液体折射率实时测量系统

Real-time measuring system for liquid refractive index based on Fourier transform spectrum analysis

应用光学. 2023, 44(5): 1061–1067 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503001>

一种基于参数标定的投影条纹周期简易校正方法

Simple correction method for projection fringe period based on parameter calibration

应用光学. 2021, 42(1): 119–124 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103004>

基于傅里叶变换的细胞牵引力测量研究

Research on cell traction measurement based on Fourier transform

应用光学. 2021, 42(2): 317–326 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203005>

FFT动态相位重建算法的滤波窗影响分析

Analysis for effect of filter window on fast Fourier transform dynamic phase reconstruction algorithm

应用光学. 2020, 41(1): 163–169 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0105002>

基于梯形与正弦相移算法的非线性误差校正

Nonlinear errors correction based on trapezoidal plus sinusoidal phase shifting algorithm

应用光学. 2022, 43(2): 304–310 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1429-09

引用格式: 黄宏志, 童陈恩, 许肇波, 等. 基于弦分布与频谱分析的相位误差校正 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1429-1437.

HUANG Hongzhi, TONG Chen'en, XU Zhaobo, et al. Phase error correction based on chord distribution and spectral analysis[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1429-1437.



在线阅读

基于弦分布与频谱分析的相位误差校正

黄宏志¹, 童陈恩², 许肇波¹, 张 磊³, 蔡柏林^{1,4}

(1. 安徽大学 互联网学院, 安徽 合肥 230039; 2. 安徽大学 人工智能学院, 安徽 合肥 230601; 3. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230036; 4. 国家农业生态大数据分析与应用工程研究中心, 安徽 合肥 230039)

摘 要: 针对条纹投影三维测量中物体局部镜面反射引起的饱和相位误差, 以及投影仪与摄像机伽马效应导致的非线性误差, 提出了一种基于弦分布与频谱分析的相位误差校正方法。首先, 从理论上分析了饱和信号模型, 并推导出了饱和相位误差的特性。其次, 对饱和图像信号开展频谱分析, 通过傅里叶变换实现饱和相位校正。最后, 运用基于弦分布均衡化的相位误差校正算法, 降低了伽马效应引起的非线性误差。该方法在不引入额外条纹图像的条件下, 可同时抑制条纹投影三维测量中的饱和相位误差和非线性相位误差。仿真和实验结果验证了所提出方法的有效性。

关键词: 条纹投影; 相位误差; 傅里叶变换; 弦分布

中图分类号: TN29; TP391

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0603001

Phase error correction based on chord distribution and spectral analysis

HUANG Hongzhi¹, TONG Chen'en², XU Zhaobo¹, ZHANG Lei³, CAI Bolin^{1,4}

(1. School of Internet, Anhui University, Hefei 230039, China; 2. School of Artificial Intelligence, Anhui University, Hefei 230601, China; 3. School of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 4. National Engineering Research Center for Agro-Ecological Big Data Analysis and Application, Hefei 230039, China)

Abstract: To address the saturated phase error caused by the local specular reflection of the object, and the nonlinear error resulting from the gamma effect of the projector and the cameras in fringe projection three-dimensional (3D) measurement, a phase error correction method based on the string distribution and spectrum analysis was proposed. First, the saturated signal model was theoretically analyzed, and the characteristics of the saturated phase error were derived. Then, spectral analysis was performed on the saturated image signal, and the saturated phase correction was completed using Fourier transform. Finally, a phase error correction algorithm based on chord distribution equalization was employed to reduce the nonlinear error induced by the gamma effect. This method can simultaneously mitigate both saturated and nonlinear phase error in fringe projection 3D measurement without requiring any additional fringe image. Simulation and experimental results demonstrated the effectiveness of the proposed method.

Key words: fringe projection; phase error; fourier transform; chord distribution

收稿日期: 2024-06-01; 修回日期: 2024-08-01

基金项目: 国家自然科学基金 (52105538, 61935008); 安徽省重点研发计划 (202304a05020055); 安徽省优秀科技创新团队项目 (2022AH010005)

第一作者: 黄宏志, E-mail: huang.hongzhi@outlook.com

通信作者: 蔡柏林, E-mail: cbl@ahu.edu.cn

引言

条纹投影轮廓术 (fringe projection profilometry, FPP) 由于其非接触、精度高、速度快、成本低等优点而被广泛应用。FPP 的过程如下: 首先, 投影仪将标准的条纹图案投射到被测表面上, 然后, 摄像机捕获变形的条纹图案, 最后, 利用三维测量系统的内外参数以及变形条纹图案中包含的相位信息, 重建物体的三维形状^[1-2]。相位提取是 FPP 的关键。在 FPP 中, 相移法是最常用的包裹相位提取方法, 因其具有高精度、高分辨率、对噪声和表面反射率不均抑制能力强的优势而被广泛应用^[3]。然而, 由于被测表面的局部镜面反射和摄像机的有限动态范围, 捕获的条纹图案可能出现局部饱和, 从而引入饱和误差, 同时摄像机和投影仪设备的伽马效应, 会导致获取的条纹图像强度存在非线性, 这两个因素共同造成相位计算误差, 影响测量精度, 进而使得难以获得准确的物体三维数据。因此, 如何有效消除饱和和相位误差和非线性相位误差仍有待研究。国内外诸多学者对这一问题进行了研究, 并提出了许多有效的方法。

消除饱和和相位误差的方法主要分为^[4]: 多重曝光融合、增加偏振滤光片和自适应投影强度法。ZHANG S 等^[5]通过捕捉不同曝光量的条纹图像序列, 并融合像素值, 避免了反射率高的区域出现图像饱和, 但需要手动选择曝光, 且需大量图片。FENG S J 等^[6]提出了曝光自动生成算法, 减少用户干预, 但对反射率分布不显著的物体效果差。RAO L 等^[7]提出了基于自动多次曝光的 FPP 技术, 将图像划分为多个区域, 确保每个区域的调制大于阈值, 以预测曝光。ZHANG S^[8]提出了一种曝光策略, 用一次低曝光下的普通图像确定全局最佳曝光时间, 实现高动态范围目标的测量。王柳^[9]等人提出了一种自适应条纹投影技术, 用于检测和标记待测物体表面的过度曝光点, 并通过非线性最小二乘法确定最适合的最大输入灰度, 以实现三维形貌恢复。CHEN T B 等^[10]提出了一种半透明物体的三维测量方法, 通过结合偏振和相移技术, 有效减小了表面下散射的影响, 避免过饱和, 然而, 这种方法用于测量较暗的极光时, 往往会产生较大的误差。在抑制饱和和相位误差的解决方案中, 除在相机端优化曝光时间外, WADDINGTON C 等^[11]提出根据需求选择投影强度以减小饱和误差的方法, 但仅靠单一全局投影强度, 其校正效果有限。同时, 上述方法在消除饱和误差时, 并未考虑非线性误差的影响, 导致测量精度仍然受限。

非线性误差校正方法主要分为^[12]: 主动补偿法^[13]、查找表法 (look-up table, LUT)^[14]、反向补偿法^[15]和希尔伯特变换法^[16]。王子龙等人^[14]基于相位误差的周期性和对称性特点, 提出了一种基于 1/6 周期查找表的非线性误差补偿方法。该方法将相位误差数据存储在 LUT 中, 从而实现精确且高效的相位误差补偿, 且能够提供稳定的校正结果。刘路等人^[17]提出了一种附加二值条纹的相位展开误差校正方法, 利用二值条纹与相位编码条纹的互补性, 有效地消除相位展开误差, 但这需要额外投射条纹图像, 限制了系统的测量速度。CAI 等人^[18]通过希尔伯特变换生成额外的条纹图案, 然后通过对两张相位图取平均来校正误差, 但该方法不能有效消除边缘部分的误差。综上可知, 现阶段的非线性误差校正方法本身流程繁琐, 这些方法与饱和相位校正方法结合后, 整体的相位误差校正会变得更加复杂。

综上所述, 虽然饱和和相位误差和非线性误差各有不同的解决方法, 但同时消除这两种误差的方法却鲜有被提出。为了解决这一问题, 本文提出了一种基于弦分布与频谱分析的相位校正方法。通过对饱和条纹图像进行频谱分析, 运用傅里叶变换 (fourier transform, FT) 对饱和和相位进行校正, 并结合弦分布均衡算法对非线性误差进行校正。该方法能够同时消除饱和和相位误差和非线性误差。在消除这两种误差的过程中, 该方法不需要引入任何额外的条纹图像, 从而简化了测量步骤。整体测量过程灵活简便, 具有较高的通用性。

1 基本原理

1.1 相移轮廓术

相移轮廓术是条纹投影三维测量最常用方法之一, 其中相移条纹的图像强度可表示为

$$g_n(x, y) = a + b \cos(2\pi f x - 2\pi n/N) \quad (1)$$

式中: $a=b=0.5$ 为常数; (x, y) 为像素坐标; f 为投影条纹图案的频率, $f=S/W$, 其中 S 为条纹图案的周期数, W 为条纹图案的宽度; n 为第 n 步相移, $n \in [0, N-1]$; N 为相移总步数; $2\pi n/N$ 为相移步长。生成的条纹图像, 经过物体调制后, 其强度可表示为

$$I_n = A(u, v) + B(u, v) \cos[\varphi(u, v) - 2\pi n/N] \quad (2)$$

式中: $A(u, v)$ 和 $B(u, v)$ 分别为背景和调制强度; $\varphi(u, v)$ 为需要求解的包裹相位; (u, v) 为相机平面像素坐标, 为了简化计算, 以下方程中省略像素坐标 (u, v) 。当 $N \geq 3$ 时, φ 、 A 和 B 可以通过如下式所示的相

移算法求解^[19]。

$$A = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n \quad (3)$$

$$B = \frac{2}{N} \sqrt{\left\{ \sum_{n=1}^N I_n \sin[2\pi(n-1)/N] \right\}^2 + \left\{ \sum_{n=1}^N I_n \cos[2\pi(n-1)/N] \right\}^2} \quad (4)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N I_n \sin[2\pi(n-1)/N]}{\sum_{n=1}^N I_n \cos[2\pi(n-1)/N]} \quad (5)$$

式(5)中, φ 被限制为 $-\pi$ 到 π , 其所求得的相位实际上是不连续的, 因此通常需要使用相位展开算法进行相位展开, 该过程如下式所示

$$\Phi = \varphi + 2\pi k \quad (6)$$

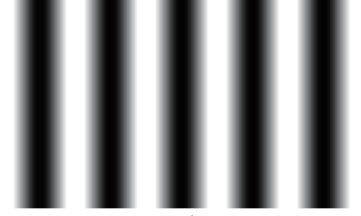
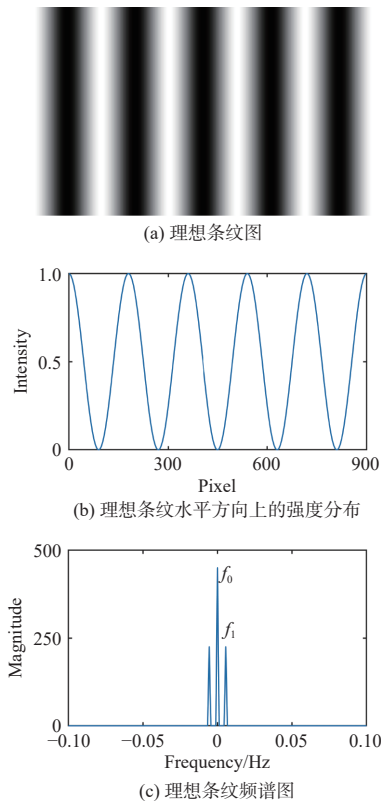
式中: Φ 为绝对相位; k 为条纹级次。

1.2 饱和相位误差校正方法

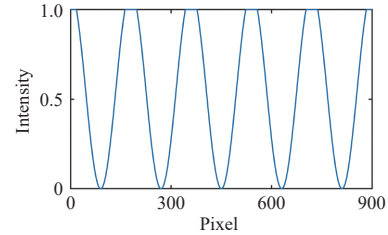
当条纹的图像强度达到饱和时, 其强度可表示为

$$g_n^S = \begin{cases} g_n, & g_n \leq 255 \\ 255, & g_n > 255 \end{cases} \quad (7)$$

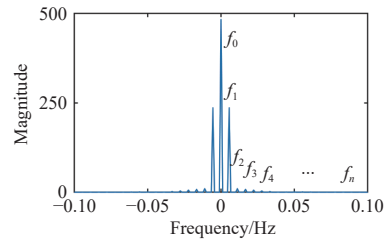
式中: 上标 S 用于区分未饱和条纹图像强度。为分析饱和引起的相位误差, 需要进一步研究上式中的饱和信号。本文首先对饱和信号进行 FT 分析, 然后对 FT 频谱进行分析, 如图 1 所示。



(d) 饱和条纹图



(e) 饱和条纹水平方向上的强度分布



(f) 饱和条纹频谱图

图 1 条纹图和 FT 频谱

Fig. 1 Fringe images and FT spectrums

通过对比饱和条纹和理想条纹的 FT 频谱, 可以发现饱和条纹由基次谐波和高次谐波组成。因此, 可将饱和信号视为不同频率的混叠信号, 并建立如式(8)所示模型, 为了简化计算描述, 以下方程中将省略像素坐标 (x, y) 。

$$g_n^S = \tilde{A} + \sum_{i=1}^k \tilde{B}_i \cos[i(\varphi + 2\pi n/N)] \quad (8)$$

式中: $\tilde{A}$ 为背景强度; $\tilde{B}_i$ 为 i 次谐波调制强度。基于该模型, N 步相移算法计算得到的饱和相位为

$$\varphi^S = \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N g_n^S \sin(\frac{2\pi n}{N})}{\sum_{n=1}^N g_n^S \cos(\frac{2\pi n}{N})} \right] = \arctan \frac{-A \sum_{n=1}^N \sin(\frac{2\pi n}{N}) + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^k B_i \cos[i(\varphi + \frac{2\pi n}{N})] \sin(\frac{2\pi n}{N})}{A \sum_{n=1}^N \cos(\frac{2\pi n}{N}) + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^k B_i \cos[i(\varphi + \frac{2\pi n}{N})] \cos(\frac{2\pi n}{N})} \quad (9)$$

饱和引起的相位误差定义为

$$\begin{aligned}
\Delta\varphi &= \varphi^s - \varphi \\
&= \arctan \left\{ \frac{-\cos\varphi \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^k X_i - \sin\varphi \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^k Y_i}{\cos\varphi \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^k Y_i - \sin\varphi \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^k X_i} \right\} \\
&= \arctan \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{i=2}^k (B_{i+1} - B_{i-1}) \sin \left[i(\varphi + \frac{2\pi n}{N}) \right]}{B_1 N + \sum_{n=1}^N \sum_{i=2}^k (B_{i+1} + B_{i-1}) \cos \left[i(\varphi + \frac{2\pi n}{N}) \right]} \right\} \quad (10)
\end{aligned}$$

式中, X_i 和 Y_i 可表示为

$$\begin{cases} X_i = B_i \cos[i(\varphi + \frac{2\pi n}{N})] \sin(\frac{2\pi n}{N}) \\ Y_i = B_i \cos[i(\varphi + \frac{2\pi n}{N})] \cos(\frac{2\pi n}{N}) \end{cases} \quad (11)$$

对于 N 步相移算法, 该算法只保留 $k=iN$ 阶谐波相关的误差, 同时抑制其他阶谐波相关的误差。饱和引起的相位误差可进一步推导为

$$\Delta\varphi = \arctan \left[\frac{\sum_{i=1}^k (P_{iN+1} - P_{iN-1}) \sin(iN\varphi)}{1 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (P_{iN+1} + P_{jN-1}) \cos(iN\varphi)} \right] \quad (12)$$

式中: $P_k=B_k/B_1$, 其中 B_k 和 B_1 分别为高次谐波强度和基次谐波强度。由于 FT 是基于频域的方法, 空间域的光强对其影响相对较小。因此, 饱和信号可以通过 FT 进行处理。具体步骤为: 首先通过对捕获的每个饱和条纹进行二维 FT, 然后使用窗函数对 FT 谱进行滤波, 再通过傅里叶反变换 (inverse fourier transform, IFT) 得到滤波后的条纹。

$$g_n^F = \text{real}\{F^{-1}[\text{win} \cdot [F(I_n^S)]]\} \quad (13)$$

式中: $\text{real}\{\cdot\}$ 函数用于提取复数实部; $\text{win}[\cdot]$ 为汉宁窗, 可描述为

$$\text{win}(f_x, f_y) = \begin{cases} p + q \cos(\pi \cdot r / T), & n \leq T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

式中: p 、 q 为权值; $r=[(f_x-f_{1,x})^2+(f_y-f_{1,y})^2]^{0.5}$, 其中 $(f_{1,x}, f_{1,y})$ 为基频 f_1 的在频域中的坐标, 基频 f_1 的值由投影条纹图案的周期决定; T 为窗口滤波器的阈值。需要注意的是, 实际应用中由于必须保证基频不被破坏, 所以无法完全消除高次谐波。因此, 窗口滤波器的阈值应设置得足够大, 以保留基频, 尽管这样会残留部分高次谐波。

最后, 根据式(6), 利用滤波后的条纹计算出相位分布 Φ 。对于滤波后的信号, 只要考虑 n 阶谐波

就足够了。虽然接近基频 f_1 的谐波可能仍然存在, 但其强度已被窗口滤波大大降低。

1.3 弦分布均衡化非线性误差校正

伽马效应会导致设备产生或捕获的光强大小无法正确地匹配理想中的光强信号大小, 使得投影仪无法正确地投射出理想强度的条纹。同时, 摄像机也难以捕获理想强度的条纹图像。条纹强度的失真会严重影响相位值的测量精度, 为了保证测量精度的可靠性, 需要抑制伽马效应导致的非线性误差。

一些基于频域变换或者额外相移图像的伽马非线性误差校正方法, 正是根据相位误差的频率分布特征对相位误差进行校正^[20-21]。但相位误差的分布特征也可以通过相位值的概率分布来反映。理想情况下, 包裹相位值应是均匀分布的, 但受到伽马非线性影响的条纹图案可能导致包裹相位值的分布出现扰动, 不再均匀。因此, 本文运用了基于弦分布均衡 (chord distribution equalization, CDE) 的非线性误差校正方法, 直接调整包裹相位值, 使其概率分布均匀, 从而实现误差校正的目的。

理想包裹相位值在 $0 \sim 2\pi$ 范围内分布较为均匀, 因此, 可以通过修正包裹相位值的概率分布来消除非线性相位误差^[22]。

极坐标中包裹相位和极坐标角的取值范围都在 0 到 2π 之间。因此, 以包裹相位值为极角, 可得到包裹相位在极坐标系中的表达式, 如图 2 所示, 这些变量中, ρ 为极半径, θ 为极角度, 极坐标 $M(\rho, \theta)$ 表示点 $\phi(x, y)$ 。为了方便计算, 将所有的极半径 ρ 设为 1 , 取逆时针方向为正方向。极轴 OX 处的极角设为零。首先, 按照行 (列) 优先级的顺序, 将包裹相位值依次添加到极坐标系统中。然后, 将相邻两点连接起来, 得到包裹相位的弦分布图。其中, M_i 和 M_j 是弦分布图中相邻的两个点, 其对应的极角分别为 θ_i 和 θ_j 。 $C_{i,j}$ 是由 M_i 和 M_j 组成的弦 (chord), $C_{i,j}$ 可以计算为

$$C_{i,j} = 2 \sin\left(\frac{\theta_j - \theta_i}{2}\right) \quad (15)$$

显然, 弦 $C_{i,j}$ 的长度是由其对应的夹角 $\theta_j - \theta_i$ 决定的。因此, 可以通过调整角度的值来校正弦的分布, 其流程图如图 3 所示。首先, 将包裹相位转换为极坐标系下的表达形式。具体方法是将二维包裹相位图按行或列优先的顺序展开为一维的包裹相位值序列, 生成一个结构体数组, 其中每个元

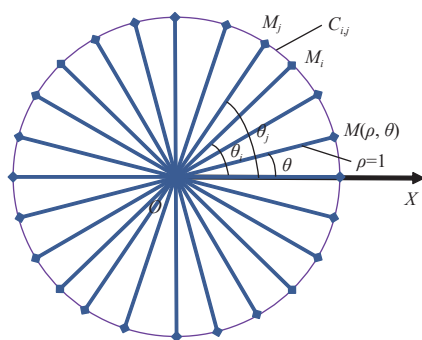


图2 极坐标及弦分布图

Fig. 2 Polar coordinate and chord distribution diagram

素包含两个属性:极值(angle)和次序(order)。接着,对数组中的元素按极值升序排序,得到新的结构体数组。然后,计算该数组中每两个相邻元素的极值之间的夹角,并计算出所有夹角的平均值。利用夹角平均值对极值分布进行均衡化处理,生成新的极值序列,存储在新的结构体数组中。结合均衡化后的极值和原始极值,计算得到最终的极值序列。最后,将极值序列的元素按照属性次序升序排列得到最终的结构体数组,以还原校正后的包裹相位图。经过均衡化算法的校正,包裹相位中的数值分布可以得到很好的均衡,从而精确地抑制非线性误差。

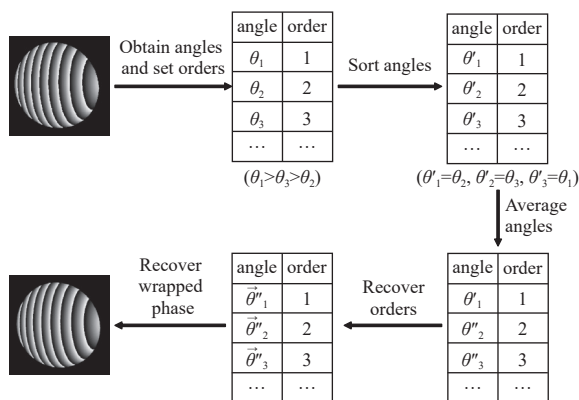


图3 弦分布均衡化校准

Fig. 3 Chord distribution equalization correction

1.4 弦分布与频谱分析的相位误差校正

本文提出的基于弦分布与频谱分析的相位误差校正方法结合了弦分布均衡化方法和傅里叶变换分析方法,以实现饱和和相位误差与非线性误差的校正。通过对饱和条纹进行傅里叶变换,再利用相移法计算出包裹相位,并在此基础上采用弦分布均衡化方法对包裹相位进行非线性校正,以得到校正后的展开相位结果。图4为本文所提

出方法的流程图。具体步骤如下:

1) 使用投影仪向待测物体表面投射正弦波条纹,同时利用相机捕捉投影在物体表面形成的条纹图案,确保相机能够清晰拍摄。

2) 对捕获的每个饱和条纹图进行二维 FT,通过窗函数对 FT 频谱进行滤波后,再利用 IFT 得到滤波后的条纹图像,以消除图像饱和和对后续相位计算的影响。

3) 使用包裹相位求取算法从滤波后的条纹图像中获取待测物体的包裹相位信息,但此时的相位信息仍存在非线性误差,需经过后续处理。

4) 运用弦分布均衡化算法对步骤三中获取的包裹相位进行处理,校正其中的非线性误差,得到更接近真实值的校正后包裹相位。

5) 利用相位展开算法对校正后的包裹相位进行展开,得到待测物体的展开相位。

6) 利用展开相位信息计算物体表面每个像素点的三维坐标,将其转换为物体表面的点云模型,进而获取物体的三维重建结果。

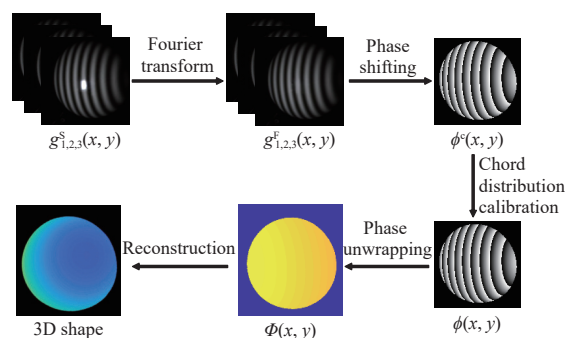


图4 本文所提出的相位误差校正方法的流程图

Fig. 4 Flowchart of the proposed phase correction method

2 仿真实验

为评估本文方法的有效性,进行了平面仿真实验,实验生成的条纹图像的分辨率为 500×500 像素。在仿真过程中,通过伽马效应模拟投影仪和相机的非线性误差。具有伽马效应的条纹可以通过如下方式生成: $g'_n = [g_n]^\gamma$, 其中 γ 为伽马值,模拟中 γ 取 1.2。此外,为了更真实地模拟实际测量环境,还考虑了其他因素引入的噪声,例如添加了均值为零且标准差为 0.02 的高斯白噪声。图5(a)为仿真生成的理想三步相移条纹图像,其条纹周期数为 64。图5(b)和图5(c)分别为理想的包裹相

位和展开相位。同时,利用计算机生成了周期相同、强度饱和的相移条纹图像,如图 5(d)所示。图 5(e)为经过 FT 方法处理后的条纹图像。之后,使用相移算法计算出上述 3 组条纹图像对应的包裹相位,并通过相位展开获取平面绝对相位。图 5(f)~图 5(h)分别展示了未校正、FT 校正和 FT+CDE 校正的展开相位图,将上述 3 种方法得到的绝对相位分别与理想绝对相位进行对比。最终计算得到的 3 种方法的均方根误差 (E_{RMSE}) 分布如图 6(a)~图 6(c)所示,结果分别为 0.370 2 rad、0.141 3 rad 和 0.051 0 rad。从实验结果可以看出,本文方法在 FT 校正的基础上,进一步实现了对非线性误差的校正。与传统方法相比,本文方法具有更高的测量精度。

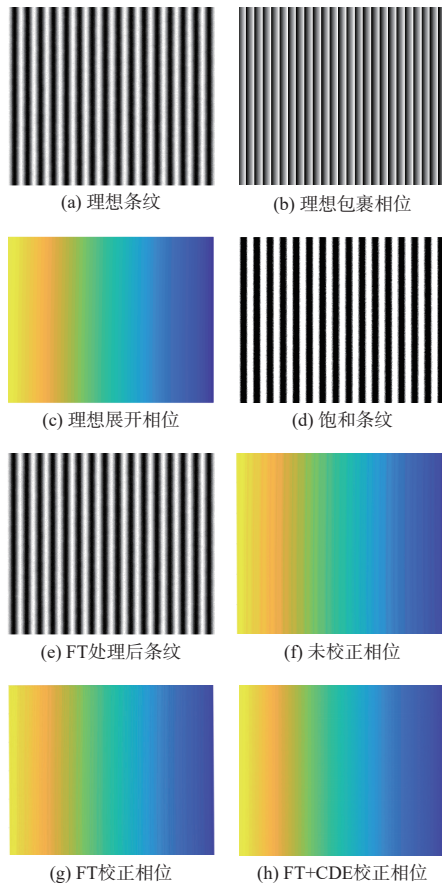
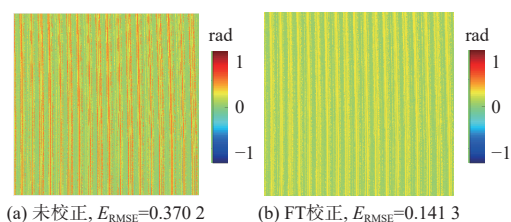


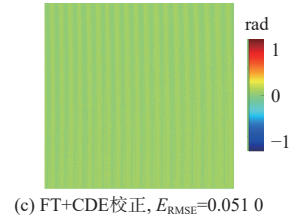
图 5 条纹图像及展开相位图

Fig. 5 Fringe images and unwrapped phase maps



(a) 未校正, $E_{\text{RMSE}}=0.370\ 2$

(b) FT校正, $E_{\text{RMSE}}=0.141\ 3$



(c) FT+CDE校正, $E_{\text{RMSE}}=0.051\ 0$

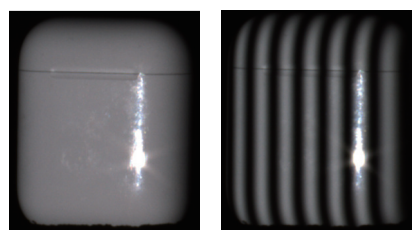
图 6 误差分布图

Fig. 6 Error distribution plot

3 实验

为验证所提出方法的正确性,搭建了一套基于 FPP 的测量系统。该系统主要由一台投影仪、一台相机及计算机组成。投影仪采用 DLP Light-Crafter 4500, 其物理分辨率为 $912 \times 1\ 140$ 像素。摄像机采用 Basler a2A1920-160ucBAS, 其分辨率为 $1\ 920 \times 1\ 200$ 像素, 配备了 12 mm 焦距镜头。本文利用计算机生成标准条纹图案, 并通过投影仪将其投射到被测量的物体表面上。然后, 相机捕捉到变形的条纹图案, 并将其传输到计算机。通过该过程可获取包裹相位、解包裹相位、投影仪参数及摄像机参数, 并利用这些信息重建三维形状。该系统被用于开展多组实验, 旨在评估所提方法的性能。由于三步相移算法仅仅需要少量条纹图即可实现三维测量, 因此本文采用三步相移算法求取包裹相位, 并以 12 步相移取得的相位作为真实参照, 以评估未校正、FT 校正和 FT+CDE 校正的效果。

本文首先对光滑的塑料耳机盒进行实验。如图 7(a)所示, 耳机盒表面出现了一处镜面反射, 从而造成了局部强度饱和。图 7(b)展示了摄像机获取的饱和条纹图像。图 7(c)展示了经过 FT 处理后的条纹图像。图 7(d)~图 7(f)分别展示了未校正、FT 校正和 FT+CDE 校正后得到的相位展开图。可以很明显地看出, 在图 7(d)中存在由强度饱和与非线性误差引入的相位误差。而经过本文所提出的校正方法处理后, 图 7(d)中的相位缺失部分得到了修复, 其误差显著减小。



(a) 耳机盒

(b) 经过调制的耳机盒条纹图

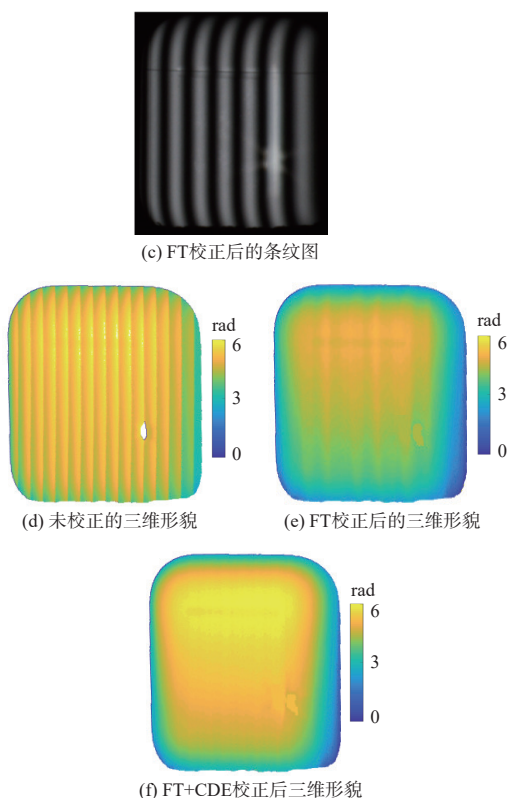


图7 以耳机盒为对象的实验

Fig. 7 Experiment using an earbud case as the object

为进一步验证所提出的方法的优势,本文通过图8所示的误差分布图对校正方法中获得的绝对相位结果进行了定量分析。图8(a)~图8(c)分别展示了未校正、FT校正和FT+CDE校正对应的相位误差分布图。本文同时计算了3种方法的均方根误差,其均方根误差分别为0.3434 rad、0.2029 rad和0.0384 rad。其中,FT校正大幅削弱了饱和强度带来的相位误差影响,但它对非线性误差的校正效果并不明显,而本文方法则进一步抑制了非线性误差的影响。相比之下,在条纹图像数量相同、测量速度一致的条件下,本文方法表现出了明显的精度提升。

为验证本文方法对复杂形状物体的测量效果,本文接着对一个反光金属块进行测量。图9(a)展示了反光金属块的图像,图9(b)展示了相机采集的其中一幅条纹图像,图9(c)展示了经过FT处理后的条纹图像。图10(a)~图10(c)分别展示了未校正、FT校正和FT+CDE校正对应的反光金属块相位误差分布图,同时计算得到各自的均方根误差,其结果分别为0.8402 rad、0.3357 rad和0.1206 rad。相比之下,在条纹图像数量相同和测量速度一致的条件下,本文方法表现出了明

显的精度提升。表明该方法也同样适用于复杂形状测量。通过以上耳机盒与反光金属块的实验结果,证实了本文所提出的方法的显著优势。

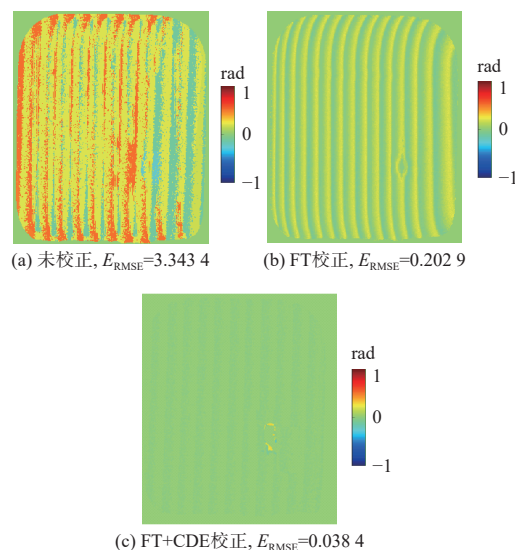


图8 误差分布图

Fig. 8 Error distribution maps

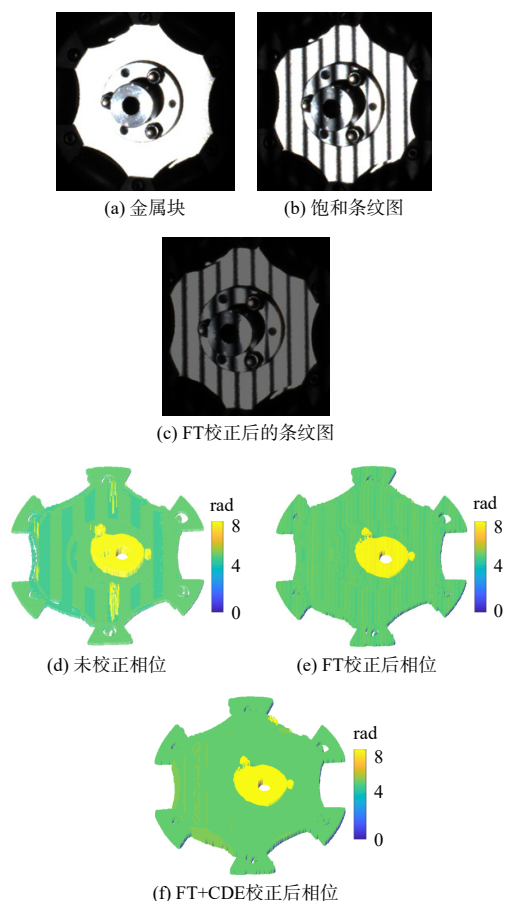


图9 以金属块为对象的实验

Fig. 9 Experiment using a metal block as the object

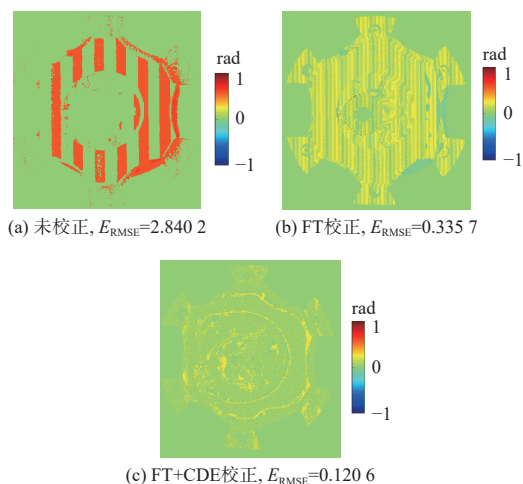


图 10 误差分布图

Fig. 10 Error distribution plot

对于结构光三维测量来说,测量精度与时间是相互制衡的^[23]。为了评估本文的方法在实际应用中的价值,将上述两组实验的时间消耗、测量精度和精度提升率做出了比较,其结果如表 1 所示。从表格中可以看出,在耳机盒实验中,相对于未校正方法,本文方法的运行时间仅额外增加了 1.558 s,但其精度提升了 98.85%。在金属块实验中,相对于未校正方法,本文方法的运行时间仅额外增加了 1.529 s,但其精度提升了 95.75%。综上所述,本文方法虽然增加了测量的时间成本,但也显著提高了测量精度。因此,本文方法在测量精度和时间之间取得了相对平衡,能够满足大多数结构光测量应用的需求。

表 1 时间消耗和误差比较

Table 1 Comparison of time cost and error

Experiments	Method	Time cost/s	$E_{\text{RMSE}}/\text{rad}$	Improvement/%
Earphone case experiment	Uncorrected	1.951	0.343 4	—
	FT+CDE	3.509	0.038 4	98.85
Experiment with metal block	Uncorrected	2.073	0.840 2	—
	FT+CDE	3.602	0.120 6	95.75

4 结论

本文提出了一种基于弦分布与频谱分析的相位误差校正方法,用于解决条纹投影三维测量中物体局部镜面反射引起的饱和相位误差,以及投影仪和相机本身引起的非线性误差。通过对饱和和图像信号的傅里叶变换分析,以及对相位误差的弦分布均衡化处理,成功地实现了对饱和误差和

非线性误差的双重校正,进而提高了测量精度。在仿真中,所提方法有效地抑制了反光引起的饱和误差和系统非线性误差。在耳机盒和反光金属块的实际测量中,本文方法有效地提高了测量精度,进一步验证了该方法在实际应用中的有效性。因此,基于弦分布与频谱分析的相位误差校正方法为提高三维测量的精度和可靠性提供了一种有效的解决方案。

参考文献:

- [1] ZHANG S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 28-37.
- [2] 王颖,倪育博,孟召宗,等. 彩色高反光表面自适应编码条纹投影轮廓术[J]. *光学学报*, 2024, 44(7): 82-90.
WANG Ying, NI Yubo, MENG Zhaozong, et al. Adaptive coding fringe projection profilometry on color reflective surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(7): 82-90.
- [3] CAI B, ZI A, TONG C, et al. Spatial coding strategy for dual-frequency phase-shifting profilometry[J]. *Measurement*, 2025, 239: 115437.
- [4] ZHANG P, KAI Z, LI Z W, et al. High dynamic range 3D measurement based on structured light: a review[J]. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, 2021, 1(2): 2021004.
- [5] ZHANG S, YAU S T. High dynamic range scanning technique[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- [6] FENG S J, ZHANG Y Z, CHEN Q, et al. General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 59: 56-71.
- [7] RAO L, DA F P. High dynamic range 3D shape determination based on automatic exposure selection[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2018, 50: 217-226.
- [8] ZHANG S. Rapid and automatic optimal exposure control for digital fringe projection technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106029.
- [9] 王柳,陈超,高楠,等. 基于自适应条纹投影的高反光物体三维面形测量[J]. *应用光学*, 2018, 39(3): 373-378.
WANG Liu, CHEN Chao, GAO Nan, et al. Three-dimensional shape measurement of high reflective objects based on adaptive fringe-pattern projection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 373-378.

- [10] CHEN T B, LENSCH H P A, FUCHS C, et al. Polarization and phase-shifting for 3D scanning of translucent objects[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [11] WADDINGTON C, KOFMAN J. Modified sinusoidal fringe-pattern projection for variable illuminance in phase-shifting three-dimensional surface-shape metrology[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 084109.
- [12] 蔡柏林. 基于条纹投影的三维测量关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- CAI Bolin. Research on key technologies of fringe projection 3D measurement[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [13] LIU K, WANG Y, LAU D L, et al. Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(3): 553-562.
- [14] 王子龙, 徐洪志, 杨玲玲, 等. 基于 1/6 周期查找表的相移条纹非线性误差补偿法[J]. *光学学报*, 2024, 44(9): 113-121.
- WANG Zilong, Xu Hongzhi, Yang Lingling, et al. Nonlinear error compensation method for phase-shifted fringe using 1/6-period lookup table[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(9): 113-121.
- [15] XU H, YANG L, ZHU H, et al. Nonlinear error reduction for phase-shifting profilometry considering periodicity and symmetry of a phase histogram[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(24): 6437-6446.
- [16] WANG B B, SUN H H, HUANG C G, et al. Double Hilbert transform based nonlinear harmonics correction for fringe projection profilometry[J]. *Optik*, 2025, 327: 172287.
- [17] 刘路, 潘艳娟, 奚冬冬, 等. 相位编码条纹投影轮廓术的相位展开误差校正方法[J]. *应用光学*, 2020, 41(5): 978-98.
- LIU Lu, PAN Yanjuan, XI Dongdong, et al. Phase unwrapping errors correction for phase-encoding based on fringe projection profilometry[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 978-98.
- [18] CAI Z, LIU X, JIANG H, et al. Flexible phase error compensation based on Hilbert transform in phase shifting profilometry[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 25171-25181.
- [19] HUANG P S, ZHANG S. Fast three-step phase-shifting algorithm[J]. *Applied optics*, 2006, 45(21): 5086-5091.
- [20] CHEN H, YIN Y, CAI Z, et al. Suppression of the nonlinear phase error in phase shifting profilometry: considering non-smooth reflectivity and fractional period[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13489-13505.
- [21] WANG Y W, CAI J X, ZHANG D S, et al. Nonlinear correction for fringe projection profilometry with shifted-phase histogram equalization[J]. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2022, 71: 5005509.
- [22] CAI B L, TONG C E, WU Q J, et al. Crosstalk suppression for color phase-shifting profilometry based on chord distribution equalization[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2023, 72: 3318730.
- [23] 张宗华, 李雁玲, 高峰, 等. 面向结构光三维测量的相位展开技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(8): 15-37.
- ZHANG Zonghua, LI Yanling, GAO Feng, et al. Phase unwrapping technology for structured light three-dimensional measurement: A review[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(8): 15-37.