中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

条纹投影非线性误差主动编码最优估计校正方法

李茂月 徐敬之 刘泽隆 黄思琦

Nonlinear error active coding optimal estimation correction method for fringe projection

LI Mao-yue, XU Jing-zhi, LIU Ze-long, HUANG Si-qi

引用本文:
李茂月, 徐敬之, 刘泽隆, 黄思琦. 条纹投影非线性误差主动编码最优估计校正方法[J]. 中国光学, 2025, 18(6): 1365-1375. doi: 10.37188/CO.2024-0167
LI Mao-yue, XU Jing-zhi, LIU Ze-long, HUANG Si-qi. Nonlinear error active coding optimal estimation correction method for fringe projection[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(6): 1365-1375. doi: 10.37188/CO.2024-0167

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024-0167

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非线性系统中双频光栅相位测量

Phase measurement with dual-frequency grating in a nonlinear system

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 726 https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0013

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

重投影优化的自由双目相机位姿估计方法

Pose estimation for free binocular cameras based on reprojection error optimization

中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1400 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0105

CCD非线性效应对双频光栅三维面形测量的影响

Influence of CCD nonlinearity effect on the three-dimensional shape measurement of dual frequency grating

中国光学（中英文）. 2021, 14(3): 661 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0143

结合光源分割和线性图像深度估计的夜间图像去雾

Nighttime image dehazing with a new light segmentation method and a linear image depth estimation model

中国光学（中英文）. 2022, 15(1): 34 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0114

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

文章编号 2097-1842(2025)06-1365-11

条纹投影非线性误差主动编码最优估计校正方法

李茂月*, 徐敬之, 刘泽隆, 黄思琦
（哈尔滨理工大学 先进制造智能化技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080）

摘要: 条纹投影技术在三维测量和表面形貌重建中得到广泛应用, 其相位质量是决定测量精度的关键因素, 而输入光强和输出光强之间的非线性效应是导致相位误差的主要来源之一。为了解决这一问题, 本文提出了一种新的系统非线性主动校正方法。该方法首先通过对标准平面投影少量的均匀灰度图像, 获取输入光强与输出光强的变化规律。然后, 将这一规律与系统非线性主动校正相结合, 建立了基于输入输出光强变化的系统非线性模型。接着, 利用遗传算法求解最优编码值, 从而通过条纹编码主动校正了投影条纹。经过校正后的条纹有效减少了非线性效应带来的影响, 大幅提升了相位获取的质量。为了验证所提方法的有效性, 以三步相移为例进行了计算机仿真。结果表明, 标准误差降低了 88%, 最大误差减少了 85.5%。在实际标准平面实验中, 校正后标准相位误差由 0.0706 rad 降至 0.0168 rad, 最大相位误差由 0.4129 rad 降至 0.0960 rad。在人脸石膏模型实验中, 校正后的标准相位误差由 0.0472 rad 降至 0.0102 rad, 最大相位误差由 0.2990 rad 降至 0.2408 rad。在复杂形貌人脸石膏件的三维重建中, 校正后表面质量得到显著提升, 影响相位质量的水波纹效应大幅减小。与现有的大步相移方法相比, 本文提出的方法不仅具有较高的相位获取精度, 而且在所需数据量和操作便捷性方面也具有明显优势, 显示出广泛的应用前景。

关 键 词: 非线性校正; 条纹投影; 最优值估计; 相位质量; 结构光测量
中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2024-0167 **CSTR:** 32171.14.CO.2024-0167

Nonlinear error active coding optimal estimation correction method for fringe projection

LI Mao-yue*, XU Jing-zhi, LIU Ze-long, HUANG Si-qi
(*Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology*, *Ministry of Education*, *Harbin University of Science and Technology*, *Harbin* 150080, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *lmy*0500@163.*com*

Abstract: Stripe projection technology is widely used in 3D measurement and surface morphology reconstruction, where phase quality is a critical determinant of measurement accuracy. However, the nonlinear relationship between input and output light intensity is a major source of phase error. To address this issue, this paper introduces a novel system nonlinear active correction method. This method captures the variation pattern between input and output light intensity by projecting a small number of uniform gray-scale images onto a standard plane. This pattern is then integrated with active system nonlinear correction to construct a system

收稿日期: 2024-09-25; **修订日期:** 2024-10-12
基金项目: 黑龙江省自然科学基金(No. LH2022E085); 国家自然科学基金(No. 51975169)
Supported by Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (No. LH2022E085); National Natural Science Foundation of China (No. 51975169)

nonlinear model based on the input-output light intensity variation. Genetic algorithms are used to optimize the coding values, which are then used to actively correct the projected fringes via fringe coding. The corrected fringes effectively reduce the influence of nonlinear effects, thereby significantly improving the quality of phase acquisition. To validate the proposed method, computer simulations were performed using three-step phase shifting. The results showed an 88% reduction in the standard error and an 85.5% reduction in the maximum error. In actual standard plane experiments, the corrected standard phase error decreased from 0.0706 rad to 0.0168 rad, and the maximum phase error decreased from 0.4129 rad to 0.0960 rad. In the face plaster model experiments, the corrected standard phase error decreased from 0.0472 rad to 0.0102 rad, and the maximum phase error decreased from 0.2990 rad to 0.2408 rad. In 3D reconstruction of complex morphology plaster models of human faces, the surface quality was significantly improved, and the water ripple effect, which affects the phase quality, was significantly reduced. Compared with existing large-step phase-shifting methods, the proposed method not only achieves high phase acquisition accuracy, but also offers significant advantages in terms of required data volume and operational convenience, demonstrating broad application potential.

Key words: nonlinear correction; fringe projection; optimal value estimation; phase quality; structured light measurement

1 引 言

条纹投影轮廓术是一种非接触式三维测量技术，广泛应用于工业检测、质量控制、医学成像等领域。该技术具有测量速度快、精度高、不损伤待测物体等优点[1]。其基本原理是利用相位测量法，通过分析条纹图案的相位变化获取物体的高度信息，使其在更多应用场景中展现出强大的实用性和潜力[2-3]。

结构光测量的质量极大地依赖于所获取的相位质量，因为相位上的任何误差与失真都会直接反映到最终的测量结果中。在众多影响因素中，结构光系统中投影仪与相机的 Gamma 非线性效应是最主要的一个。这种非线性强度响应问题导致输入亮度与输出亮度之间的关系不再是线性的，从而使得预先生成的正弦条纹图案在测量过程中变形为非正弦形态，进而导致获取的相位信息出现误差，极大地影响了测量精度[4]。目前国内外学者已经提出许多非线性校准技术与模型，主要分为主动校正与被动校正两种类型。

主动校正是通过对光栅系统的 Gamma 值进行标定，从而在投影前对光栅条纹进行处理，使得相机捕获的条纹图像具有高质量相位。Hoang T 等人[5] 通过将三步相移与大步相移相结合，测定了测量系统的 Gamma 值，用于条纹的主动校正，但大步相移所使用的投影图像过多，需要进行多次运算，当数据图像不足时无法适用。Zhang S[6] 证明使用高阶多项式函数对系统主动校正的非线性进行建模时，都可以提供高质量的拟合精度。Zhu ZH M 等人[7] 建立了一组具有已知投影条纹信息和未知非线性参数的方程。但该方法无法适用于快速测量的情况，具有一定的局限性。

被动校正是捕获条纹图案后被动补偿相位误差的方法，王子龙等人[8] 提出一种基于 1/6 周期 LUT（sLUT）的误差补偿方法，极大地缩短了误差补偿的计算时间，实现了快速相位误差补偿。Xiong CH 等人[9] 通过测量相位图中的数据信息，在不影响误差补偿结果的前提下，简化了基于查找表的测量实现过程。然而，这些方法往往依赖于大量的亮度信息，或者需要额外的信息辅助，因此，操作复杂、准备时间长，且数据采集过程易受外界干扰，影响数据一致性和准确性[10-16]。

针对结构光系统非线性效应产生的相位误差及校正过程繁琐问题，本文提出一种条纹投影主动编码值最优估计的非线性误差校正方法。该方法只需少量的均匀灰度图像，在确定输入输出光强变化规律的基础上，建立了基于输入输出光强变化的系统非线性模型及优化目标函数，获取结

构光系统的非线性校正最优值, 从而完成系统投影条纹非正弦性校正。实验结果验证了方法对非线性引起的相位失真的有效性, 确保获取到高质量的相位信息, 保证了测量精度。

2　条纹投影及非线性主动校正原理

2.1　理想条纹投影原理

结构光单目测量系统主要由投影仪、被测物体、相机接收装置和计算机组成, 如图 1 所示。投影仪向被测物体投射经过编码的条纹图案, 使得理想的编码图案在被测物体表面产生畸变。相机采集发生畸变的图案, 将蕴含被测物体深度信息的图片保存至计算机中进行相位处理。最后, 通过结合系统标定信息, 实现对被测物体的三维测量。

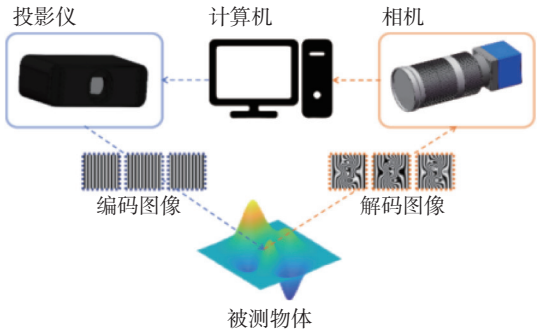


图 1　结构光测量系统

Fig. 1　Structured light measurement system

结构光三维测量过程中, 通过特定的编码策略对投影仪投影的图片进行调制是整个测量过程中的第一步。以相移法为例, 将投影条纹在一个周期内均匀移动 N 步 ($N\geqslant 3$), 每次投射的条纹相位移动 $2\pi/N$ 步, 所生成的条纹公式为:

$$I_n(x,y)=A+B\cos[\phi(x,y)+2\pi\,(n-1)/N] \quad , \quad (1)$$

式中, $I_n(x,y)$是空间坐标(x,y)上第 n 步相移的亮度, A是背景光强, B是条纹调制系数, N是总相移步数, $\phi(x,y)$是包裹相位, 可表示为:

$$\phi(x,y)=\arctan\frac{\sum_{n=1}^{N}I_n(x,y)\sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^{N}I_n(x,y)\cos(2\pi n/N)} \quad , \quad (2)$$

其中三步相移包裹相位公式为:

$$\phi(x,y)=-\arctan\frac{\sqrt{3}(I_2-I_3)}{2I_1-(I_2+I_3)} \quad . \quad (3)$$

理想的包裹相位图像可以精确表征被测物体表面的相位分布信息。这些相位值通过反正切函数被包裹在$(-\pi,\pi]$区间内。随后, 通过相位展开方法可以将这些包裹的相位值转换为连续的相位分布。

2.2　非线性效应误差主动校正模型

系统相位获取的图像质量至关重要, 直接影响着测量精度。结构光三维测量过程中, 投影仪和相机的非线性效应、外界环境光源和物体表面的反射等都会对相位精度产生影响。其中, 投影仪与相机固有的非线性效应的影响尤为显著, 它们往往导致投影条纹发生非正弦变形, 成为影响相位精度的主要障碍。

计算机调制后的生成光栅亮度图像分布I_n^i, 通过投影仪投射后, 光栅亮度I_n^p变为:

$$I_n^p=f_1(I_n^i) \quad , \quad (4)$$

式中: $f_1(I_n^i)$为投影仪输出光强的响应函数, 主要体现为投影仪的非线性效应所产生的非线性误差。

投射条纹在环境光及物体表面自身反射后的亮度为I_n^o可表示为:

$$I_n^o=r(I_n^p+a) \quad , \quad (5)$$

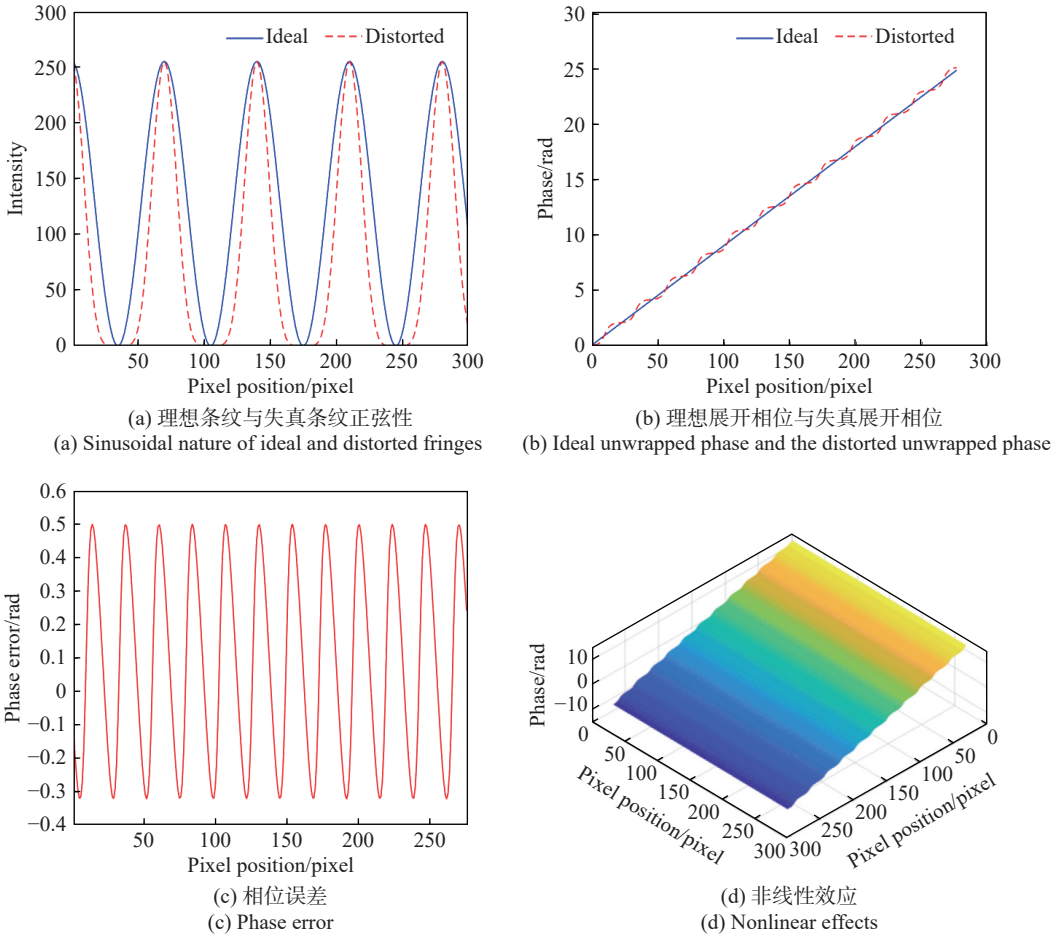
式中: r为被测物的表面反射率, a为环境光强。

投射条纹被相机捕获后的条纹亮度I_n^c可表示为:

$$I_n^c=f_2(I_n^o) \quad , \quad (6)$$

式中: $f_2(I_n^o)$为相机对输入光强的响应函数。

整个过程中对测量精度影响最大的因素是由于投影仪和相机非线性效应产生的条纹非正弦化误差。如图 2(a)(彩图见期刊电子版) 所示, 蓝色实线表示计算机生成的标准正弦条纹, 红色虚线表示非线性效应影响下的投影条纹亮度改变。图 2(b)(彩图见期刊电子版) 为三步相移下的展开相位, 蓝色实线为理想展开相位, 红色虚线为失真的展开相位, 图 2(c)(彩图见期刊电子版) 为二者的相位误差。图 2(d)(彩图见期刊电子版) 是非线性效应在测量平面展开相位上的直观表现, 可见, 原本应该平滑的相位信息出现了波纹, 称之为水波纹效应。



(a) 理想条纹与失真条纹正弦性
(a) Sinusoidal nature of ideal and distorted fringes

(b) 理想展开相位与失真展开相位
(b) Ideal unwrapped phase and the distorted unwrapped phase

(c) 相位误差
(c) Phase error

(d) 非线性效应
(d) Nonlinear effects

图 2　非线性效应对相位质量的影响

Fig. 2　The influence of nonlinear effects on phase quality

3　主动编码值最优估计的非线性误差校正方法

在实际测量过程中，由于设备参数存在广泛差异性以及环境光源具有高度多变性，因此，获取包含系统非线性变化的输入光强与理想输出光强之间的变化规律，是研究校正系统非线性、还原条纹正弦性的基础。

通过对投影仪理想输出光强进行编码，将亮度分别为$I_1^{\text{out}}, I_2^{\text{out}}, I_3^{\text{out}} \cdots I_n^{\text{out}}$的 n 张均匀灰度图像投射到参考平面上，并通过相机捕获这些图像以获取输入光强$I_1^{\text{in}}, I_2^{\text{in}}, I_3^{\text{in}} \cdots I_n^{\text{in}}$。随后，利用高阶多项式对输入光强与理想输出光强的变化关系进行拟合，如图 3 所示，从而建立系统输入与输出亮度的数学模型。拟合获得$I_n^{\text{in}} = g(I_n^{\text{out}})$的函数关系，如式 (7) 所示：

$$I_n^{\text{in}} = g(I_n^{\text{out}}) = a + bI_n^{\text{out}} + cI_n^{\text{out}^2} + \cdots + nI_n^{\text{out}^n} \quad , \quad (7)$$

式中：I_n^{in}为系统捕获的输入光强，I_n^{out}为输出理想光强。

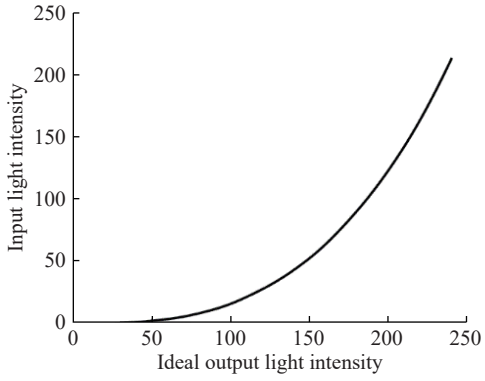


图 3　输入光强与理想输出光强关系

Fig. 3　Relationship between input light intensity and ideal output light intensity

针对目前主动校正方法需要通过大量灰度图像或复杂编码图像来获取系统输入输出光强，导致非线性校正预编码过程繁琐的情况，本文提出了一种创新性的解决方案。简化了校正流程，仅

使用少量图像, 极大地降低了系统复杂性。同时, 针对 CCD 相机的光学设计和传感器布局可能导致捕获投影光强不均匀的现象, 本文提出以图像中心为圆心, 提取 80% 区域的平均亮度作为输入亮度。这种方法不仅减少了校正步骤, 还有效保证了校正的精确度和效率。

理论上, 在结构光系统的非线性主动校正中, 若能成功推导出反函数g^{-1}, 就能够从计算机编码的输出光强端对整个系统进行误差校正。但高阶多项式的求解过程不仅计算量大, 而且结果可能对初始条件或选择的求解方法高度敏感, 且反函数并不唯一, 用于系统校正时稳定性低、误差大。在高阶多项式中, 求反函数通常面临两个主要问题: 一是多值性, 即对于某些输出值 y, 可能会存在多个输入值 x 对应同一个输出值; 二是解的复杂性, 尤其是当多项式具有多个局部极值时, 使用传统的解析方法难以精确求解, 且反函数并不唯一。

遗传算法是一种基于自然选择和生物进化的启发式搜索算法, 特别适合解决高阶多项式中反函数求解的复杂性问题。高阶多项式中往往包含多个局部极值和拐点, 而遗传算法通过其特有的交叉、变异等操作, 在复杂的解空间中能够进行多次迭代搜索, 不仅能有效避免陷入局部极值, 还能在多解的情况下找到全局最优解。遗传算法的优势在于它通过种群的进化过程, 逐步逼近最优解, 针对传统解析方法对初始条件和解法选择的敏感性, 确保了系统校正过程的稳定性和精度, 极大地提升了系统求解主动最优编码值的实用性。

实际中, 考虑到条纹投影过程中的背景光强、幅度调制以及系统复杂度, 整个系统的变化可表示为:

$$I_n^c = \alpha (I_n^i)^\gamma + \beta \quad , \tag{8}$$

式中: α为调制幅度, β为背景光强。

对于式 (8), 可由 3 张不同亮度的灰度图像得到:

$$\begin{cases} I_1^c = \alpha (I_1^i)^\gamma + \beta \\ I_2^c = \alpha (I_2^i)^\gamma + \beta \\ I_3^c = \alpha (I_3^i)^\gamma + \beta \end{cases} . \tag{9}$$

对式 (9) 进行数学变换得:

$$\frac{I_1^c - I_2^c}{I_1^c - I_3^c} = \frac{(I_1^i)^\gamma - (I_2^i)^\gamma}{(I_1^i)^\gamma - (I_3^i)^\gamma} \quad . \tag{10}$$

非线性效应对条纹投影的影响主要表现在对条纹正弦性的影响, 最终导致相位求解不准确。其直观表现为系统理想光强与相机捕获光强的差异。将非线性主动校正与输入输出光强的变化规律进行联立, 可得到输入输出光强变化的系统非线性模型。即:

$$\frac{I_1^c - I_2^c}{I_1^c - I_3^c} = \frac{(I_1^i)^\gamma - (I_2^i)^\gamma}{(I_1^i)^\gamma - (I_3^i)^\gamma} = \frac{b(I_1^i - I_2^i) + c(I_1^{i^2} - I_2^{i^2}) + \cdots + n(I_1^{i^n} - I_2^{i^n})}{b(I_1^i - I_3^i) + c(I_1^{i^2} - I_3^{i^2}) + \cdots + n(I_1^{i^n} - I_3^{i^n})} \quad . \tag{11}$$

此时, 式 (11) 只有γ未知, 故可将式 (11) 变为关于γ的函数:

$$f(\gamma) = \frac{(I_1^i)^\gamma - (I_2^i)^\gamma}{(I_1^i)^\gamma - (I_3^i)^\gamma} - \frac{b(I_1^i - I_2^i) + c(I_1^{i^2} - I_2^{i^2}) + \cdots + n(I_1^{i^n} - I_2^{i^n})}{b(I_1^i - I_3^i) + c(I_1^{i^2} - I_3^{i^2}) + \cdots + n(I_1^{i^n} - I_3^{i^n})} \quad . \tag{12}$$

为平衡计算复杂度与最优解的效果, 初始种群大小设定为 100, 同时为了确保能够获得最优解, 将最大迭代次数设定为 100。一般情况下, 投影仪的伽马值通常在 2.2 到 2.6 之间, 而相机的传感器接收到的光信号与图像亮度的输出并非线性关系, 大多数相机的默认伽马值为 2.2。然而, 在实际应用中, 结构光投影仪和相机的非线性效应、外界环境光源以及物体表面的反射等因素都会对相位精度产生影响。因此, 将所求最优编码值的上下界设置在较大的范围 [0,10], 以应对这些不确定性。

此时, $f(\gamma)$可作为优化的目标函数, 将求γ值问题转化为寻优过程, 即通过求得$f(\gamma)$趋近于 0 的最优解, 实现系统的主动校正。

最后, 通过主动编码的方式对系统的非线性误差进行校正。使用主动编码最优值估计的非线性误差校正步骤为:

(1)通过计算机编码生成多幅均匀灰度图像, 且将图像投影到标准平面上。使用相机捕获投影图像的中心区域, 记录该区域的平均光强, 获得投影图像在不同灰度级下的光强数据。

(2)拟合输入灰度值与输出光强之间的关系函数。建立关于γ值的优化目标函数, 通过对该函数进行寻优, 得出系统 γ 的最优值。

（3）将得到的最优γ值编码到投影的条纹光栅公式中，实现系统的非线性校正，提高相位获取质量。

4 实 验

4.1 仿真实验

为验证提出方法的实际应用可行性，在 Matlab 中对本文方法进行仿真，对其有效性进行评估。条纹的正弦性如图 4 所示，可见校正后的正弦性更为准确。对 3 组相移条纹进行相位求解，图 5 为某一行的相位展开对比结果，图 6 为校正前后与理想相位的差值表现。具体定量数值如表 1 所示。从表 1 可以看出，校正后相位误差有了显著的改善。未校正时，标准相位误差为 0.2894 rad，而经过校正后，标准相位误差降至 0.036 rad，减少了约 88%。同样，最大相位误差从未校正时的 0.4120 rad 降低到校正后的 0.060 rad，减少了约 85.5%。由此可知，经过校正后，标准相位误差和最大相位误差均有显著下降。

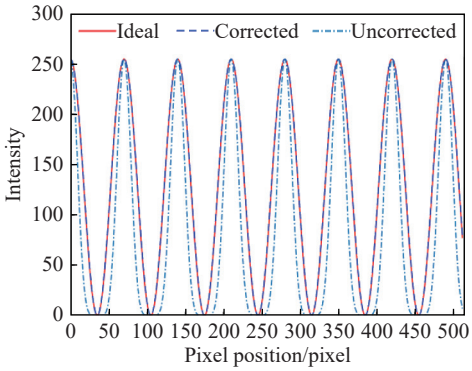


图 4 第 300 行条纹正弦性对比

Fig. 4 Sinusoidal contrast of the 300th stripe

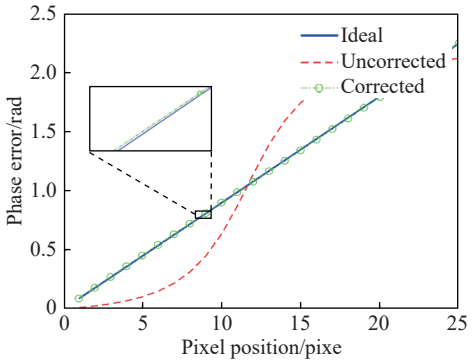


图 5 校正前后展开相位与理想展开相位对比

Fig. 5 Comparison of corrected and uncorrected phases with the ideal unwrapped phase

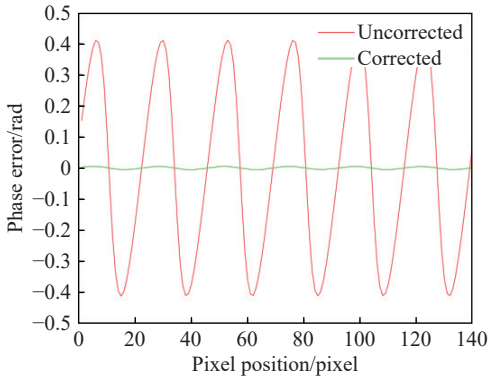


图 6 某一行相位误差图

Fig. 6 Phase error in one line

表 1 相位误差仿真模拟结果

Tab. 1 Simulation results of phase error

Method	Uncorrected	Corrected
Std. phase error/rad	0.2894	0.036
Max phase error/rad	0.4120	0.060

4.2 测量实验

本文搭建了一套结构光三维检测平台，实验现场如图 7 所示。系统由可二次开发的微型投影仪 MIS（分辨率为 1920 pixel×1080 pixel），大恒相机 MER-130-30UM-L（分辨率为 1280 pixel×1024 pixel），VST 变焦镜头（焦距为 8 mm~50 mm）组成。整个系统存在非线性效应。投影方案采用三步相移法，计算机的配置为 AMD Ryzen7 5800H with Radeon Graphics 3.20 GHz CPU、16GB 内存，采用白色纸板作为校准平面。

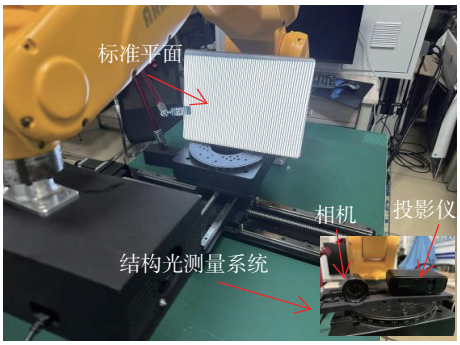


图 7 实验设备

Fig. 7 Experimental equipment

首先，将计算机生成的 8 张均匀灰度图像投影到标准平面上，并通过相机进行捕获。随后，以图像中心为圆心，提取 80% 区域的平均亮度作为输入亮度。接着，将获得的亮度数据与计算机生

成的理想亮度进行比较, 利用高阶多项式模型表示输入光强与理想光强之间的关系。然后, 将该关系转化为遗传算法的目标函数, 以此获得最优的主动编码值。最后, 使用获得的编码值对条纹光栅进行校正, 获取高质量的相位信息, 从而实现系统的非线性校正。

由于工业相机具有特定的响应范围, 当投影亮度超出这一范围时, 输入亮度与输出亮度的变化不明显, 表现出明显的“平台效应”。为避免这种平台效应对输入输出灰度光强拟合精度的影响, 并确保灰度光强拟合的准确性, 将计算机生成的均匀灰度图片设置在 (50, 200) 亮度范围内。本文随机选取标准均匀灰度图像的灰度分别为 51、70、90、124、143、151、164、184。系统所捕获图像如图 8 所示, 灰度分别为 3.066 3、9.099 8、12.010 1、31.605 5、50.799 2、58.205 9、72.017 4、94.478 0。

图 8　捕获的灰度图像

Fig. 8　Captured grayscale images

经过拟合可得到参数理想输出光强与捕获输入光强的关系式为:

$$I_n^{\text{in}} = p_1 + p_2 I_n^{\text{out}} + p_3 I_n^{\text{out}^2} + p_4 I_n^{\text{out}^3} + p_5 I_n^{\text{out}^4} + p_6 I_n^{\text{out}^5}, \tag{13}$$

式中: $p_1 = -214.9, p_2 = 11.09, p_3 = -0.213\,4, p_4 = 0.001\,951, p_5 = -8.298e-06, p_6 = 1.351e-08$。

设置遗传算法的种群大小为 100, 最大迭代次数为 100, 得到系统的校正最优值为 2.69, 将得到的最优值在光栅编码中进行系统校正。

为了进一步验证本文方法的优越性, 选取了一块材质与校准平面不同的光滑牛皮纸板作为测量对象, 尺寸为 210 mm×297 mm。采用具有较强抗非线性效应能力的十二步相移算法, 将获取的相位作为标准相位, 并使用大步相移[5] 的方法作为对比。图 9(彩图见期刊电子版) 显示了某一行的相位展开结果与标准相位之间的差值。

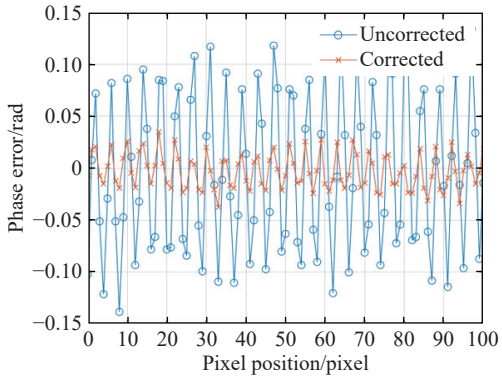
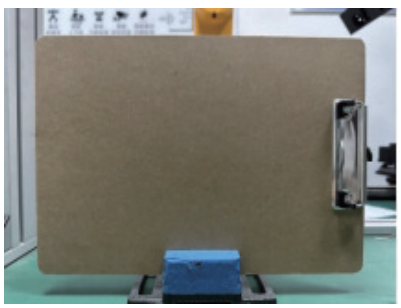


图 9　某一行相位误差图

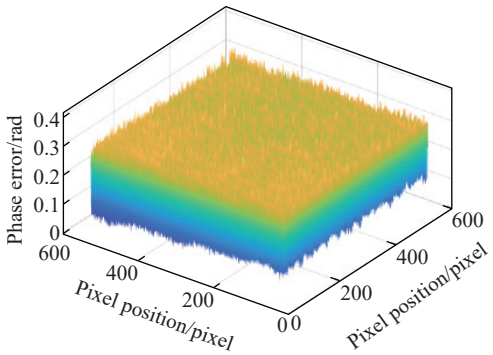
Fig. 9　Phase error in one line

图 10(彩图见期刊电子版) 为牛皮纸板平面测量结果。其中, 图 10(a) 展示了牛皮纸板的测量平面, 其表面属性与校正所用的白纸平面不同。图 10(b) 为校正前的相位误差, 可以看出相位误差十分明显。图 10(c) 和图 10(d) 分别为对比方法与本文方法的相位误差图。具体数值如表 2 所示。



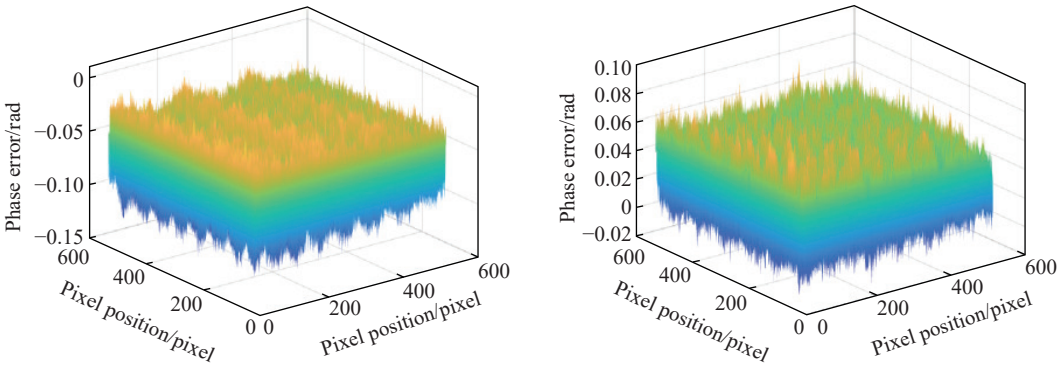
(a) 牛皮纸板测量平面

(a) Measuring plane of kraft cardboard



(b) 校正前相位误差图

(b) Phase error diagram before correction



(c) 对比方法相位误差图
(c) Phase error corrected by comparison method

(d) 本文校正方法相位误差
(d) Phase error corrected by proposed method

图 10　牛皮纸板平面测量相位对比结果

Fig. 10　Comparison of phase measurement results for Kraft cardboard plane

表 2　标准平面实验相位误差结果

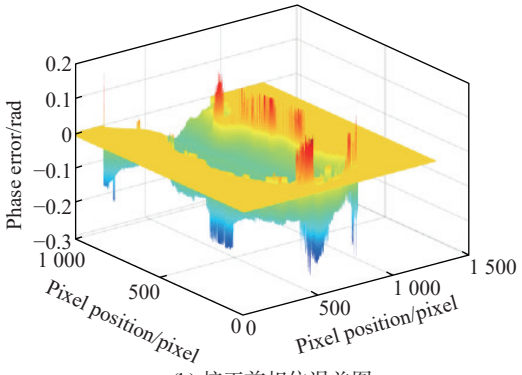
Tab. 2　Phase error results from standard plane experiments

	Uncorrected	Ref. [5]	Proposed method
Std. phase error/rad	0.0706	0.0227	0.0168
Max phase error/rad	0.4129	0.1320	0.0960

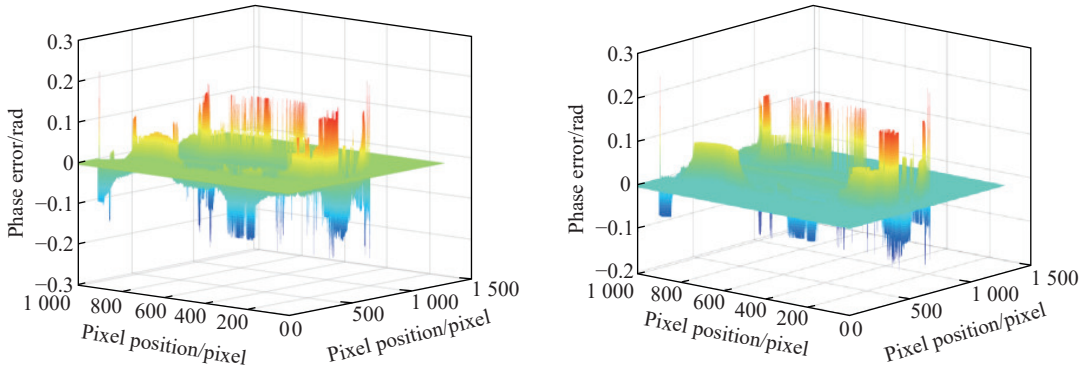
可见，未校正的情况下，标准相位误差为 0.0706 rad，最大相位误差为 0.4129 rad，误差相对较大。使用其他方法也可以显著改善测量精度，标准相位误差降至 0.0227 rad，最大相位误差为 0.1320 rad，显示出一定的校正效果。而本文方法可以进一步将标准相位误差降至 0.0168 rad，降低了约 25.9%。这表明本文方法的相位校正精度更高，能够更有效地减小整体相位的波动性。在最大相位误差方面，对比方法将误差降至 0.1320 rad，而本文方法则将其进一步减少到 0.0960 rad，减少了约 27.3%。这一数据表明，本文方法在针对极端误差校正方面具有更好的效果，能够更加准确地修正系统的最大误差。

为了验证本文方法的普适性，选择具有复杂形貌的人脸石膏模型进行实验验证。该模型具备了平面、圆滑过渡、棱角分明以及高低起伏等常见测量物体的形貌特征。图 11(a) 展示了待测的人脸石膏模型。同样以 12 步相移作为标准相位，提取感兴趣区域，作为对比，图 11(b) 给出了校正前的相位误差图，可以看出有很大的相位误差。图 11(c) 与图 11(d) 为对比方法与本文方法较标准相位的误差图，具体数值如表 3 所示。对比方法的标准相位误差为 0.0164 rad，已经明显优于未校正时的 0.0472 rad。然而，本文方法进一步将标准相位误差降至 0.0102 rad，较对比方法降低了约 37.8%。这表明本文方法在减少整体相位误差方面具有更高的精度，能够更有效地校正非线性误差。对比方法的最大相位误差为 0.2561 rad，相较于未校正时的 0.2990 rad 有所减小。本文方法将最大相位误差进一步降至 0.2408 rad，优于对比方法。

(a) 人脸石膏模型
(a) Facial plaster model



(b) 校正前相位误差图
(b) Phase error diagram before correction



(c) 对比方法相位误差图
(c) Phase error corrected by comparison method

(d) 本文校正方法相位误差
(d) Phase error corrected by proposed method

图 11　人脸石膏件实验相位对比

Fig. 11　Phase comparison of facial gypsum piece by experiment

表 3　人脸石膏件实验相位误差结果

Tab. 3　Experimental phase error results of facial gypsum piece

	Uncorrected	Ref. [5]	Proposed method
Std. phase error/rad	0.0472	0.0164	0.0102
Max phase error/rad	0.2990	0.2561	0.2408

最后将未经校正的相位信息与本文方法所获得的校正相位信息用于三维重建, 如图 12(彩图见期刊电子版) 所示。由图 12(a) 中的三维重建模型可见, 原始人脸模型的面部和眉部均出现了严重的水波纹效应, 相比之下, 图 12(b) 中的三维重建模型由于使用了校正后的相位信息, 显著减少了水波纹效应, 使得面部和眉部区域变得更加平滑。这一结果表明, 本文方法对具有复杂形貌的物体具有良好的非线性校正效果, 展现了良好的普适性。

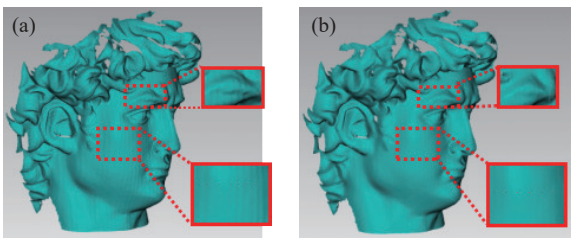


图 12　人脸石膏件 (a) 校正前及 (b) 校正后的三维重建效果

Fig. 12　3D reconstruction results of facial gypsum piece (a) before and (b) after correction

5　结　论

针对结构光三维测量中系统非线性效应对系统测量精度的影响, 本文提出了一种高效最优编码值主动校正方法, 大大降低了非线性效应导致的相位失真。

(1)通过分析条纹投影原理, 研究了系统条纹非正弦性对相位展开质量的影响。针对测量过程中非线性效应对投影条纹亮度变化的影响, 建立了预编码的非线性主动校正模型。

(2)通过投影少量灰度均匀图像, 确定了理想输出光强与捕获输入光强的变化规律。将主动校正模型与光强关系联立, 建立了基于输入输出光强变化的系统非线性模型。利用遗传优化算法, 求得了系统最优编码值, 完成了系统误差校正。

(3)对提出的校正方法进行了实验验证。仿真实验结果显示, 校正后标准相位误差从 0.2894 rad 降至 0.036 rad, 降低约 88%; 最大相位误差从 0.4120 rad 降至 0.060 rad, 降低约 85.5%。在实际标准平面实验中, 校正后标准相位误差由 0.0706 rad 降至 0.0168 rad, 最大相位误差由 0.4129 rad 降至 0.0960 rad。在结构光测量的人脸石膏模型实验中, 校正后标准相位误差由 0.0472 rad 降至 0.0102 rad, 最大相位误差由 0.2990 rad 降至 0.2408 rad。本文方法校正效果较对比方法有显著改善, 验证了本文方法的有效性与普适性。

(4)此外, 在复杂人脸石膏模型的三维重建中, 本文方法获得的表面变得更加光滑, 水波纹效应显著减少。仿真和实际测量实验结果均验证了本文方法的有效性。

条纹投影的质量直接影响着相位质量。面向

三步相移、四步相移等对非线性反应明显的少步相移，通过校正非线性效应也能够获得高质量的相位信息，其对快速测量、动态测量等测量方式有着重要意义。未来将针对获得高质量相位的影响因素，例如被测物体的表面质量、材质、反光特性、周围环境变化、最佳硬件参数等，继续开展相关技术研究，以提高相位获取的质量以及三维测量的精度。

参考文献：

[1] 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.
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).

[2] 吕虹毓, 李茂月, 蔡东辰, 等. 光栅投影在机三维形貌检测技术研究进展[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(3): 500-513.
LV H Y, LI M Y, CAI D CH, *et al*.. Research progress of grating projection on machine 3D topography inspection technology[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 500-513. (in Chinese).

[3] 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 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8): 20230126.
ZHANG Z H, LI Y L, GAO F, *et al*.. Phase unwrapping technology for structured light three-dimensional measurement: a review (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(8): 20230126. (in Chinese).

[4] 王鹏, 刘佳琪, 孙长库, 等. 正交条纹级次分区域预编码校正 Gamma 非线性方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 20210503.
WANG P, LIU J Q, SUN CH K, *et al*.. Correction of Gamma nonlinearity method by orthogonal fringe order subregional precoding[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 20210503. (in Chinese).

[5] HOANG T, PAN B, NGUYEN D, *et al*.. Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(12): 1992-1994.

[6] ZHANG S. Comparative study on passive and active projector nonlinear gamma calibration[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(13): 3834-3841.

[7] ZHU ZH M, XU X K, LONG W Q, *et al*.. The optimal algorithm for eliminating nonlinear error in phase measurement profilometry based on global statistical phase feature function[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(6): 065020.

[8] 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): 0912002.
WANG Z L, XU H ZH, YANG L L, *et al*.. Nonlinear error compensation method for phase-shifted fringe using 1/6-period lookup table[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(9): 0912002. (in Chinese).

[9] XIONG CH, YAO J, CHEN J B, *et al*.. A convenient look-up-table based method for the compensation of non-linear error in digital fringe projection[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2016, 6(1): 49-53.

[10] 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.
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).

[11] KATOCH S, CHAUHAN S S, Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(5): 8091-8126.

[12] NIKIFOROV D, EFIMOV S, PROVORNYKH I. Studying how the configuration of a genetic algorithm affects the solution of a problem[C]. *Proceedings of 2024 International Russian Smart Industry Conference*, IEEE, 2024: 768-772.

[13] LIU Y K, YU X, XUE J P, *et al*.. A flexible phase error compensation method based on probability distribution functions in phase measuring profilometry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 129: 106267.

[14] WANG Y W, ZHU H J, CAI J X, *et al*.. Intensity-averaged double three-step phase-shifting algorithm with color-encoded fringe projection[J]. *Photonics*, 2022, 9(3): 173.

[15] KAMAGARA A, WANG X ZH, LI S K. Towards gamma-effect elimination in phase measurement profilometry[J].

Optik, 2018, 172: 1089-1099.

[16] MUÑOZ A, FLORES J L, PARRA-ESCAMILLA G, *et al*.. Least-squares gamma estimation in fringe projection profilometry[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(5): 1137-1142.

作者简介：

李茂月(1981—), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 博士生导师, 2004 年于南京林业大学获得学士学位, 2007 年于长安大学获得硕士学位, 2012 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 主要从事智能加工与光学检测技术方面的研究。E-mail: lmy0500@163.com