

光学学报

基于二进制编码条纹的三维测量方法

刘佳^{1,2}, 路长秋¹, 文杰¹, 肖雨倩¹, 严飞^{1,2}, 刘银萍^{3*}

¹南京信息工程大学自动化学院, 江苏 南京 210044;

²江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;

³南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044

摘要 提出一种二进制编码条纹代替正弦条纹的方法,以降低三维测量系统的非线性误差。首先,通过对传统正弦条纹一个周期内呈正弦变化的光强值进行二进制编码,将所有二进制编码的每一位分别组合生成二值条纹,投影到被测物体表面。然后,将采集到的多幅二值条纹进行叠加,生成正弦条纹。最后,结合四步相移技术,并使用互补格雷码辅助相位展开进行实验验证。实验结果表明,所提方法相比于传统四步相移方法可以有效降低非线性伽马效应导致的相位误差,提高测量精度。对直径为 50.8140 mm 的高精度标准球进行测量,所得的局部点云与拟合标准球的平均距离为 0.0697 mm。

关键词 测量; 相移技术; 非线性误差; 二值条纹; 二进制

中图分类号 TN247 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS0112004

1 引言

结构光技术是光学三维测量领域重要的研究方向之一,具有非接触式测量、低成本和高效率等优点,已被广泛应用于工业设计、生物医学、智能制造等领域^[1-3]。应用最为广泛的结构光三维测量技术是条纹投影轮廓术^[4-6],该方法是通过投影系统将结构光投射到被测物体表面,利用成像系统拍摄调制光场,通过解调光场信息和进行系统标定来获得被测物体的深度信息。这种测量技术因其结构简单、精度高、速度快等优点而发展迅速。条纹投影轮廓术主要包括傅里叶变换轮廓术(FTP)和相位测量轮廓术(PMP)。FTP只需要投影一幅条纹图像,就可以通过傅里叶变换和傅里叶逆变换计算出物体的深度信息,适用于高速、实时测量领域,但是该方法的测量精度有限^[7-8]。PMP通过使用多幅相移条纹图像来独立地获取每个像素的相位信息,计算截断相位,可获得较高的测量精度,适用于低速、静态测量领域^[9-10]。因此,PMP是提高测量精度的更优选择。

在投影灰度条纹的过程中,三维测量系统受到非线性伽马效应的影响,测量结果中出现非线性误差。为了减小这种误差,提高测量系统的精度,国内外学者提出了多种降低非线性影响的方法,大致可以分为 3 类^[11]:1)误差补偿方法——先标定出系统的误差分布

规律,再对被物体高度调制的变形条纹进行误差补偿。Zhang 等^[12]利用事先标定的系统非线性误差表,使用查找表的方法对变形条纹在 $(-\pi, \pi]$ 的截断相位进行补偿,可以显著降低由投影仪非线性引起的相位误差。此类方法在系统环境稳定时具有较好的补偿效果,但在系统环境变化时需要重新标定,效率较低。2)离焦投影方法,如 Su 等^[13]使用的二值条纹离焦投影测量方法,该方法可以削弱投影仪的非线性影响,同时显著提高测量速度,但难以控制离焦程度,导致测量范围只能限制在较小的深度区间内。3)反向误差补偿方法。Huang 等^[14]通过额外投影附加条纹来降低非线性误差,Zheng 等^[15]在此基础上提出双四步、双五步相移方法来降低测量误差,但这两种方法均将投影条纹数量提高了 1 倍,从而降低了测量速度。此外,使用多步相移方法也可以有效地削弱非线性影响,如十二步相移方法、十六步相移方法等,但此类方法牺牲了测量效率。

本文提出一种二进制编码条纹方法,通过对正弦条纹的灰度值进行采样,获取正弦条纹的离散十进制灰度值,并对其进行二进制编码,将所有二进制编码的每一位码字分别组合生成二值条纹。通过数字投影仪进行顺序投影,对采集回来的条纹图像进行二进制叠加,生成经物体高度信息调制后的正弦条纹,以此代替传统灰度正弦条纹。将该方法结合四步相移技术,解

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-06-29; 录用日期: 2022-07-04; 网络首发日期: 2022-07-14

基金项目: 江苏省产业前瞻与关键核心技术重点项目(BE2020006-2)、国家自然科学基金(61605083)

通信作者: *yipingliu@nuist.edu.cn

出截断相位信息,使用互补格雷码方法进行相位展开,得到绝对相位。通过与传统四步相移方法进行对比实验,投影本文方法编码的二值条纹,再进行二进制叠加,可以有效减弱测量系统的非线性影响。使用投影多幅二值条纹代替投影正弦灰度条纹的方法,虽然增加了投影条纹数量,但使用数字微镜器件的DLP投影仪投影二值条纹的速度是投影灰度条纹速度的数十倍^[16],投影效率仍得到提高。相比于传统的相移和二值离焦方法,本文方法既从根源上减少了由系统非线性带来的相位误差,又不会缩小测量的深度范围。

2 基本原理

2.1 四步相移技术

PMP 由于具有高精度、高分辨率、不受被测物体表面波动影响等特点,被广泛应用于三维测量领域^[17]。该方法将 N 幅相移正弦条纹图像投影到被测物体表面,相移条纹受物体表面高度调制,通过相机采集被调制的变形条纹图像,并进行解码求取相位值。由于求取相位的计算方法是利用反正切函数,因此获取的相位 φ 截断在 $(-\pi, \pi]$ 的范围内,称其为截断相位。 N 幅相移条纹图像可以用式(1)表示,同时可以通过式(2)计算出对应的截断相位[图 1(b)]。

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{(n-1) \times 2\pi}{N} \right], n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

$$\varphi(x, y) = -\arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin \left(\frac{2n\pi}{N} \right)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos \left(\frac{2n\pi}{N} \right)} \right], \quad (2)$$

式中: $A(x, y)$ 为背景光强; $B(x, y)$ 为物体表面反射率; $\varphi(x, y)$ 为设计的相位值; N 表示 N 步相移。本文所用的方法为四步相移,即 $N=4$, 因此 4 幅条纹图像可以用式(3)~(6)表示,通过四步相移方法求取截断相位的过程如图 1 所示。

$$I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y)], \quad (3)$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{\pi}{2} \right], \quad (4)$$

$$I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \pi], \quad (5)$$

$$I_4(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{3\pi}{2} \right]. \quad (6)$$

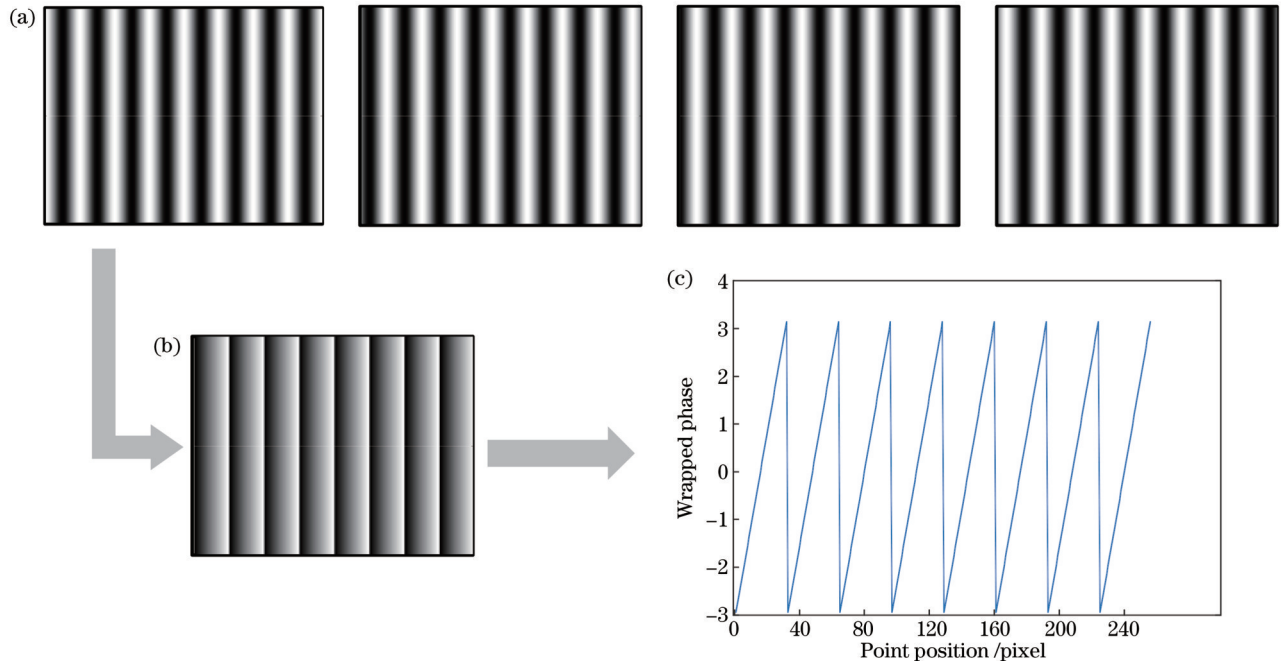


图 1 截断相位求取过程。(a)四步相移图像;(b)截断相位图像;(c)截断相位函数

Fig. 1 Calculation process of wrapped phase. (a) Four-step phase shift image; (b) wrapped phase image; (c) wrapped phase function

2.2 互补格雷码辅助相位展开方法

格雷码是一种二值编码,其相邻码字之间只有一位码字不同,是一种误差最小化的编码方式,具有鲁棒性强、不受投影系统非线性影响的特点,因此格雷码被广泛用于三维测量领域^[17]。由于相移技术解算的相位被截断在 $(-\pi, \pi]$ 范围内,呈周期性变化,因此对截断

相位进行相位展开非常重要。格雷码辅助相移技术的原理是对于 2^m 个周期的正弦条纹图像,将 m 幅格雷码图案用于标记 2^m 个被截断的相位区间级次 k , 用于辅助截断相位进行相位展开。具体实施步骤如下:将 m 幅格雷码图案利用式(7)计算出对应的十进制码字,根据式(8)将格雷码十进制码字映射为单调递增的解码

级次 $k(x, y)$, 再根据式(9)进行相位展开。

$$V(x, y) = \sum_{i=1}^m I_{GCi}(x, y) \times 2^{m-i}, \quad (7)$$

$$k(x, y) = i[V(x, y)], \quad (8)$$

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi k(x, y), \quad (9)$$

式中: I_{GCi} 表示第 i 幅格雷码图案; $V(x, y)$ 为 m 幅格雷码图案的十进制码字。在实际的投影过程中, 格雷码图案经二值化处理后, 会出现解码级次边缘和截断相位区间边缘无法匹配对齐的情况, 从而引起级次跳变误差。无论是通过投影全白图像和全黑图像取均值来获取二值化阈值, 还是利用其他方法获取阈值, 都无法完全消除级次跳变误差, 目前解决此问题的最有效方法是互补格雷码方法^[16,18]。该方法通过多投影一幅格

雷码图案, 根据式(10), 在进行解码时, 在不同的截断相位区间内, 分别用前 m 幅格雷码图案的解码级次 k_1 和 $m+1$ 幅格雷码图案的解码级次 k_2 进行相位展开, 从源头上消除了由解码级次边缘和截断相位区间边缘匹配错误带来的相位展开误差。互补格雷码辅助相移技术的解码原理如图 2 所示。

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} \phi(x, y) + 2\pi k_2(x, y), & \phi(x, y) \leq -\frac{\pi}{2} \\ \phi(x, y) + 2\pi k_1(x, y), & -\frac{\pi}{2} < \phi(x, y) \leq \frac{\pi}{2} \\ \phi(x, y) + 2\pi k_2(x, y) - 2\pi, & \phi(x, y) > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (10)$$

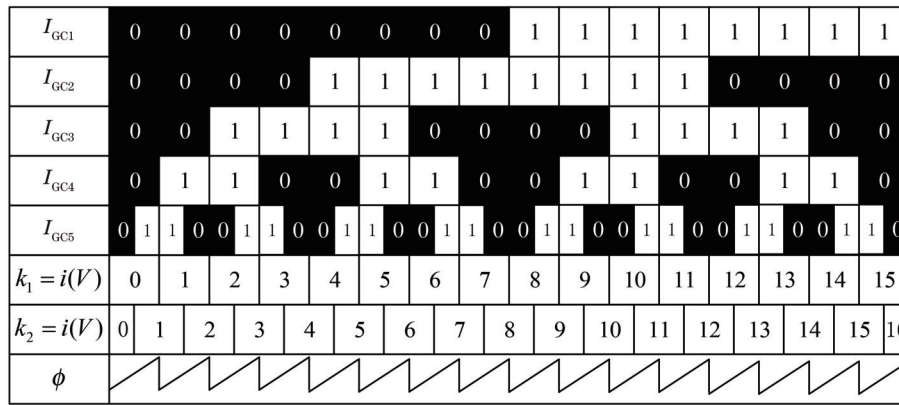


图 2 互补格雷码辅助相移技术的解码原理

Fig. 2 Decoding principle of complementary Gray code assisted phase shift technology

2.3 二进制编码原理

传统正弦条纹的灰度值会受到系统非线性伽马效应的影响, 由于二值黑白条纹不受这种影响, 测量误差明显减小, 因此可通过投影二值条纹进行二进制叠加来达到投影正弦条纹的效果, 从源头上降低非线性误差。

二进制编码建立在相移法的基础上, 使用进制转换的方式得到多幅二值条纹, 并将其代替灰度正弦条纹。在相移法中, 当一幅正弦条纹的周期数确定时, 根据其整幅条纹的像素宽度, 可以唯一确定每个周期的像素数量, 进而可以得到每个周期内像素的光强值, 这些光强在数值上呈正弦变化, 且是离散的。通过计算机模拟出一个周期的光强值, 得到光强值的十进制码, 再通过二进制转换, 可以得到对应的二进制码。由于计算机模拟的光强值在 $0 \sim 255$ 范围内, 此区间内任意大小的光强值都对应一串二进制码, 其整数部分对应的码字位数为 8, 保留一位小数时小数部分对应的码字位数为 4。

将一个周期内的 N 个光强值十进制码的整数部分和一位小数分别转换为二进制码, 然后将所有二进制的同一位次的 0 或 1 组合成一个周期的条纹, 并扩展到

每一个周期, 这样就可以得到 12 幅二值条纹图像。将生成的二值条纹投影到被测物体上, 对采集到的变形条纹通过式(11)进行二进制叠加运算, 就可以得到类似正弦条纹经物体表面高度调制后的图像 I 。

$$I = \sum_{n=1}^8 (I_n - I_b) \times 2^{(8-n)} + \sum_{n=9}^{12} (I_n - I_b) \times 2^{(12-n)}, \quad (11)$$

式中: I_n 为第 n 幅二值条纹; I_b 为一幅全黑图像, 用于减少因实际采集条纹图像过程中黑色光强值不为 0 引入的误差。

本研究以在一个正弦条纹周期内取出 16 个光强值进行以上操作为例, 所取正弦变化的光强值以及进制变换如表 1 所示。由于所取 16 个光强值的十分位数字恰好分布在 $1 \sim 7$ 范围内, 故小数部分只需要投影 3 幅二值条纹图像, 式(11)可以简化为

$$I = \sum_{n=1}^8 (I_n - I_b) \times 2^{(8-n)} + \sum_{n=9}^{11} (I_n - I_b) \times 2^{(11-n)}. \quad (12)$$

将 16 个光强值的二进制数进行逐位编码, 叠加原理如图 3 所示。为了验证叠加正弦条纹的准确性, 进行仿真实验, 图 4 为本文方法的叠加仿真示意图。其中, 图像宽度为 256 pixel, 周期为 8, 每个周期内包含 32 个像素点, 每个灰度值的 0 或 1 分别对应 2 个像

素点。后续实验所用的二值条纹均采用这种设计方式。

表 1 一个周期内光强值的二进制码分布
Table 1 Distribution of binary code of light intensity value in one cycle

Light intensity value in one cycle	Keep one decimal place	Binary code of integer part	Binary code of decimal part
0	0.0	00000000	000
9.7054	9.7	00001001	111
37.3439	37.3	00100101	011
78.7079	78.7	01001110	111
127.5000	127.5	01111111	101
176.2921	176.3	10110000	011
217.6561	217.7	11011001	111
245.2946	245.3	11110101	011
255	255.0	11111111	000
245.2946	245.3	11110101	011
217.6561	217.7	11011001	111
176.2921	176.3	10110000	011
127.5000	127.5	01111111	101
78.7079	78.7	01001110	111
37.3439	37.3	00100101	011
9.7054	9.7	00001001	111

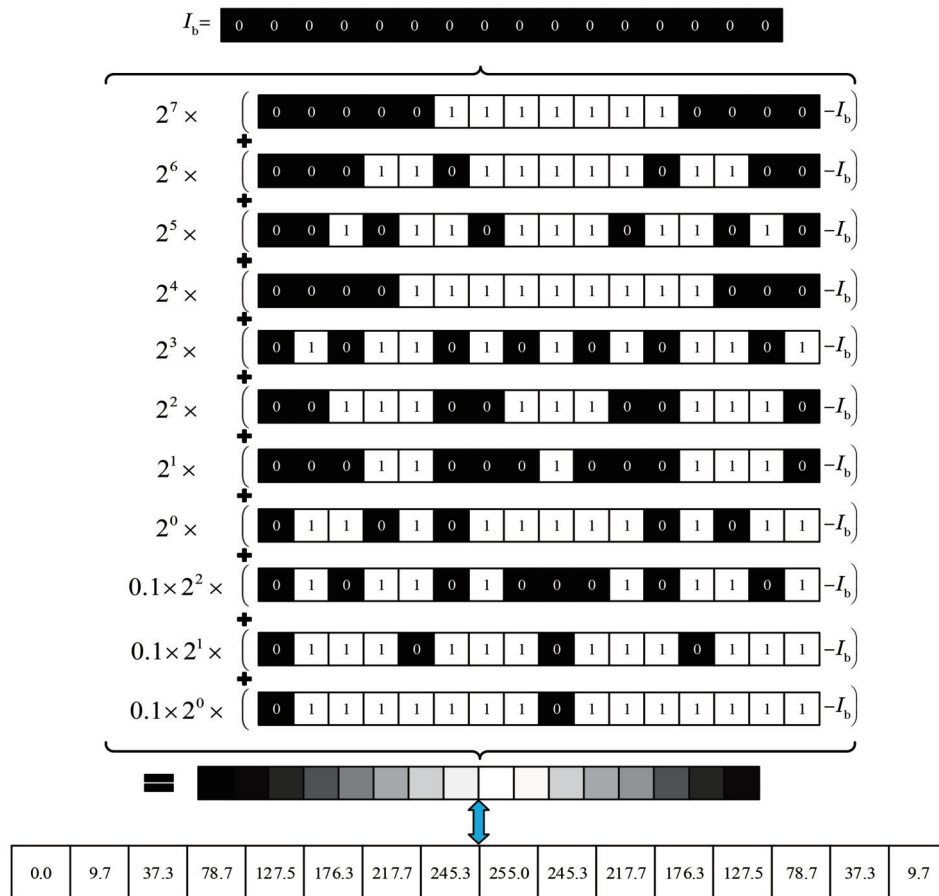


图 3 二进制编码叠加原理
Fig. 3 Superposition principle of binary coding

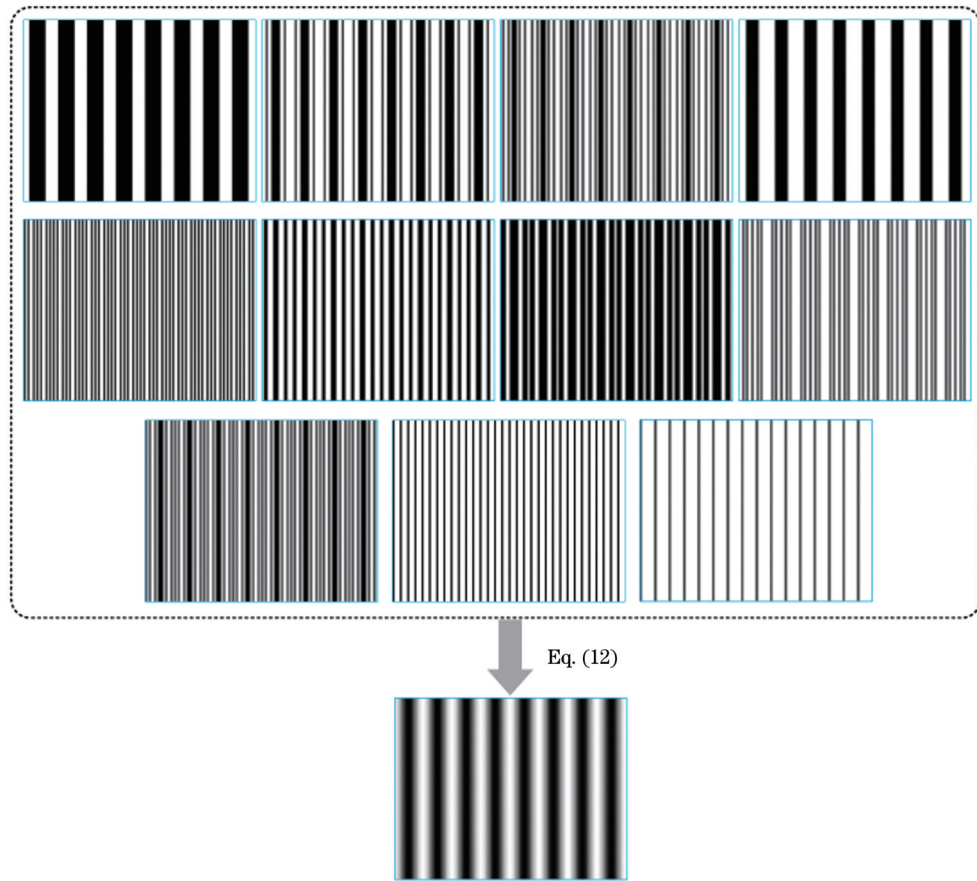


图 4 二进制编码叠加仿真示意图

Fig. 4 Schematic of superposition simulation of binary coding

3 实验结果与分析

基于实验室所构建的三维测量系统进行实验,该系统包括 DLP 投影仪 (Light Crafter 4500) 和工业相机 (Point Grey FL3-U3-13Y3M-C)。DLP 投影仪的输入分辨率为 $912 \text{ pixel} \times 1140 \text{ pixel}$, 输出分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$; 工业相机的分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。工业相机和投影仪的距离约为 10 cm , 测量系统距离被测物体约 40 cm 。

为了验证所述基于二进制编码条纹的三维测量方法可以有效减弱非线性伽马效应的影响,通过测量不同种类的物体,开展了本文方法与传统四步相移方法和十二步相移方法的对比实验。为了保证实验结果对比的科学性,所有方法使用的正弦条纹均为 32 个周期,使用互补格雷码相位展开方法进行绝对相位求解。为了获得格雷码的二值化阈值,需要再投影一幅全白图像和一幅全黑图像,全黑图像同时作为 2.3 小节中的 I_0 , 用于二进制叠加生成正弦条纹。在实验过程中,对于环境光强、工业相机的焦距及光圈、被测物体的姿态及距离等外部影响因素,3 种方法保持一致。

3.1 精度评估实验

为了评估本文方法的精度,分别使用上述 3 种方法对高精度标准球进行测量实验,该标准球的直径为

50.8140 mm 。对所测量的局部点云进行重建,并利用 Geomagic studio 软件将点云数据拟合到与高精度标准球相同尺寸的球体上,进行误差评估。图 5(a) 所示为局部点云图像,图 5(b) 所示为局部点云重建结果,图 5(c) 所示为拟合标准球结果,标准球拟合误差分析结果如表 2 所示。在本实验条件下,利用传统四步相移方法得到的局部点云数据与所拟合球体的平均距离为 0.1288 mm , 利用十二步相移方法得到的平均距离为 0.0044 mm , 利用本文方法得到的平均距离为 0.0697 mm 。由于本文方法是建立在二进制编码条纹基础上的四步相移方法,侧重于削弱系统非线性伽马效应的影响,因此无法获得与十二步相移方法同等的精度,但相比于传统四步相移方法,本文方法的精度明显提高,平均距离减少了 45.88% 。

3.2 平面测量实验

本实验分别使用 3 种方法对一块高精度的棋盘格标定板进行测量,重建结果如图 6 所示。图 6(a) 所示为 3 种方法的第一幅相移图像,其中本文方法的第一幅相移图像由二值条纹叠加生成。可以看到,在相同的实验参数下,由二进制叠加生成的正弦条纹图像整体亮度会略高于直接投影的灰度正弦条纹图像。由于所用标定板的精度较高,其表面深度变化近似于线性分布,利用 Matlab R2022a 软件中的曲线拟合器对测

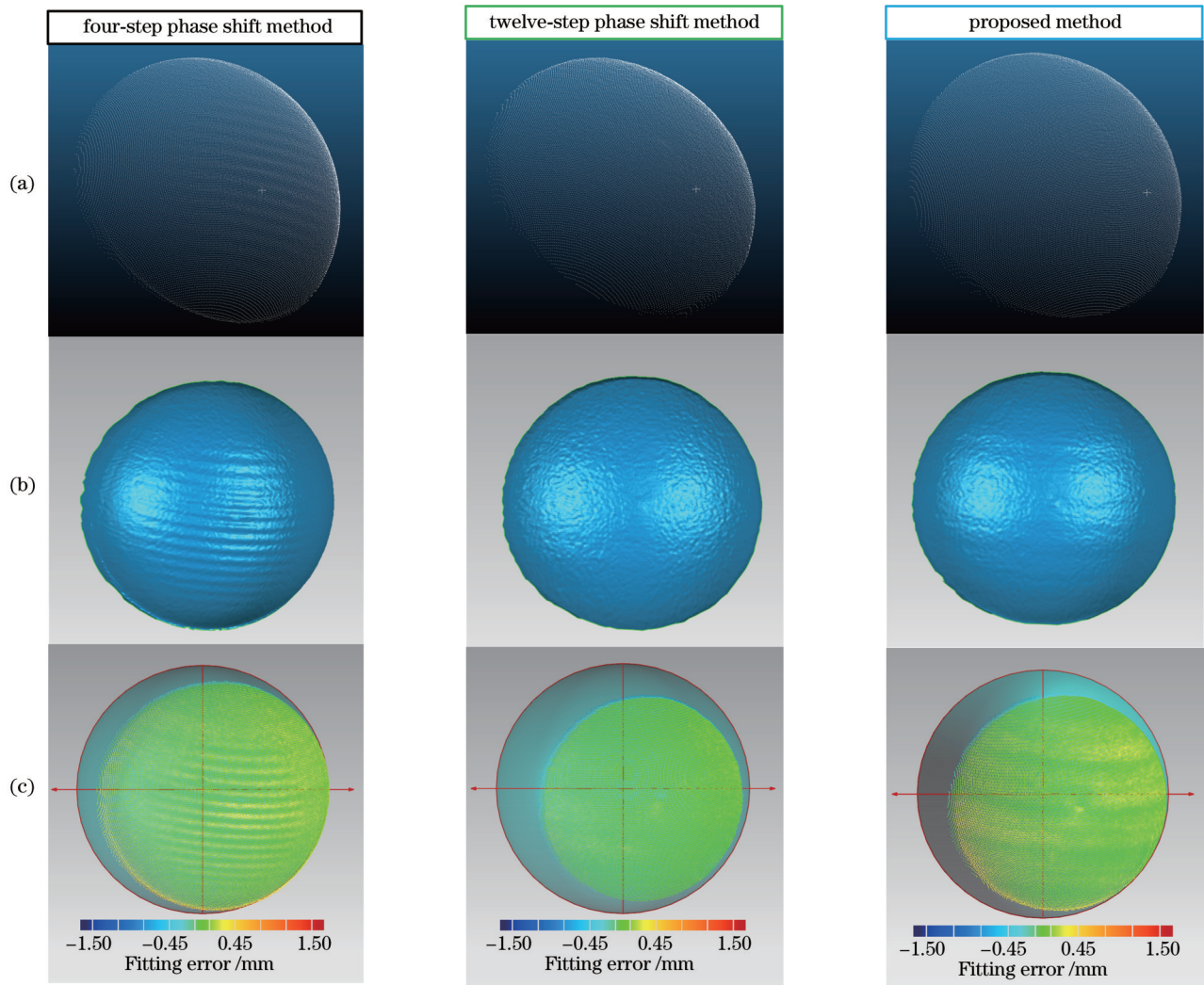


图 5 高精度标准球重建结果。(a)局部点云;(b)局部点云重建结果;(c)拟合误差分布

Fig. 5 High-precision standard sphere reconstruction results. (a) Local point clouds; (b) results of local point cloud reconstruction; (c) fitting error distribution

表 2 标准球拟合误差分析结果

Table 2 Analysis results of fitting error of standard sphere

Method	Number of point clouds	Average distance /mm
Four-step phase shift	36905	0.1289
Twelve-step phase shift	29730	0.0044
Proposed	32335	0.0697

量结果第 820 行的 401 pixel 到 600 pixel 的深度值 Z_n 进行拟合,拟合图像如图 7 所示,拟合误差分析结果如表 3 所示。实验结果表明,本文方法的方均根误差 (RMSE) 为 0.1211 mm,误差平方和 (SSE) 为 2.922 mm,本文方法的精度比传统四步相移方法高,但略低于十二步相移方法。

3.3 深度物体非线性影响实验

为了验证本文所述二进制编码条纹可以削弱非线性影响的优势,使用前文所述的 3 种方法分别对表面较为复杂的白色石膏头像进行测量,所得绝对相位与

重建结果如图 8 所示。从绝对相位结果来看,3 种方法均可以获得较好的绝对相位。从重建结果来看,传统四步相移方法受到系统非线性影响较为明显,在重建石膏头像上出现了条状的周期性误差,而本文方法的重建表面较为平滑,与十二步相移方法的重建表面类似,证明二进制编码条纹方法结合四步相移方法实现了削弱系统非线性影响的效果。从图 8 可以看出,传统四步相移方法及本文方法无论是在绝对相位中,还是在重建结果中,均得到了相比于十二步相移方法更多的深度信息,这与文献[15]的结论相同,表明所提二进制编码条纹结合四步相移的方法既保留了四步相移方法的优点,又达到了十二步相移方法削弱非线性影响的效果。

4 结 论

提出一种二进制编码条纹方法,通过对一个正弦周期内的光强值进行二进制编码来获取多幅二值条

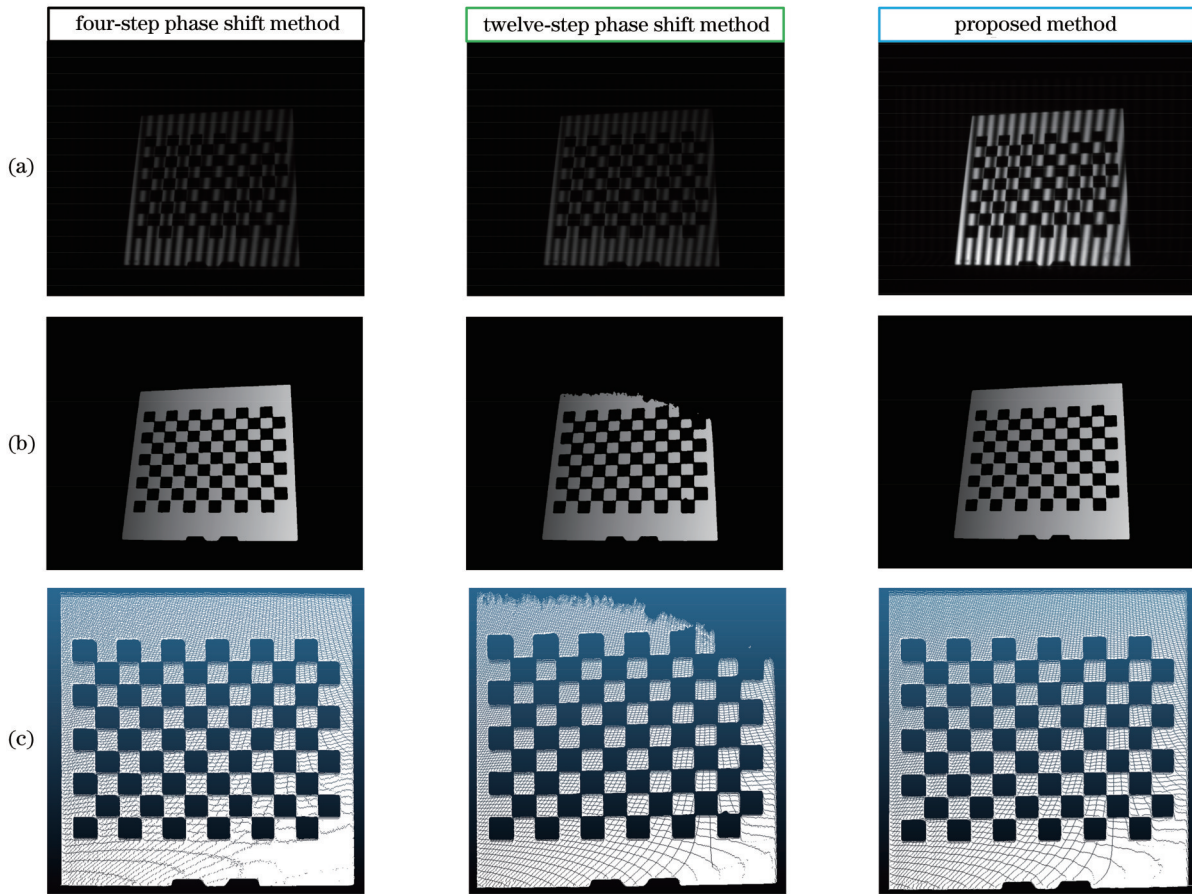


图 6 标定板测量实验结果。(a)第一幅相移图像;(b)绝对相位图像;(c)点云结果

Fig. 6 Results of calibration plate measurement. (a) The first phase shift image; (b) absolute phase image; (c) results of point cloud

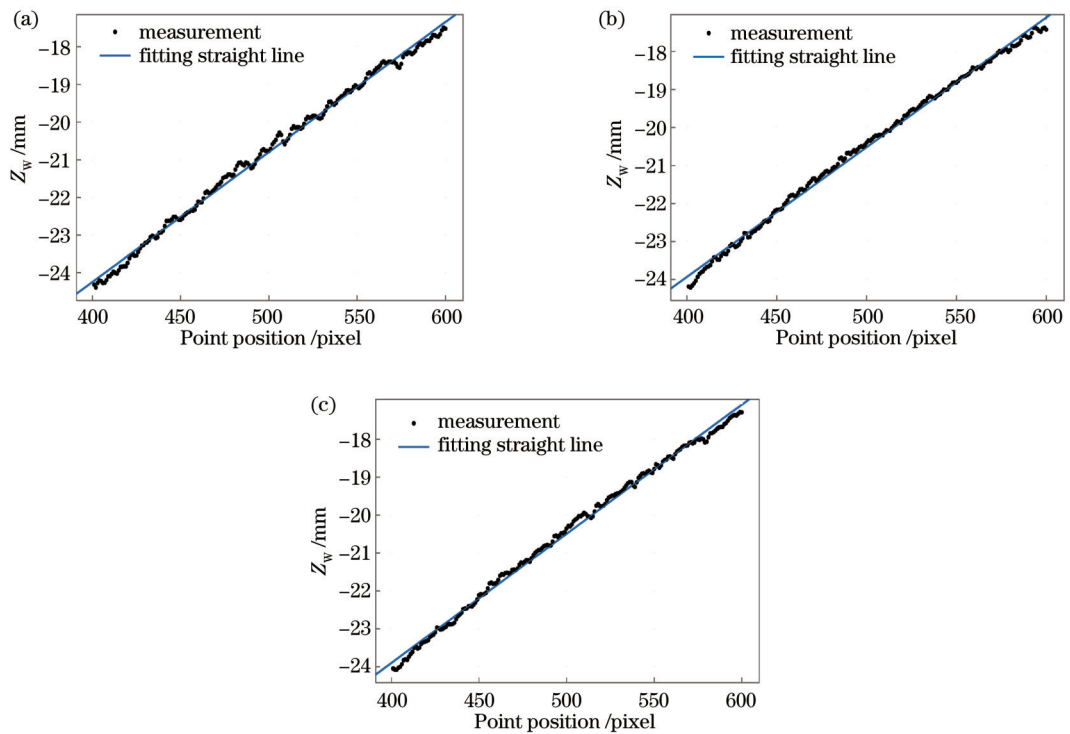


图 7 不同方法对标定板的直线拟合图像。(a)四步相移方法;(b)十二步相移方法;(c)本文方法

Fig. 7 Straight line fitting images of calibration plate by different methods. (a) Four-step phase shift method; (b) twelve-step phase shift method; (c) proposed method

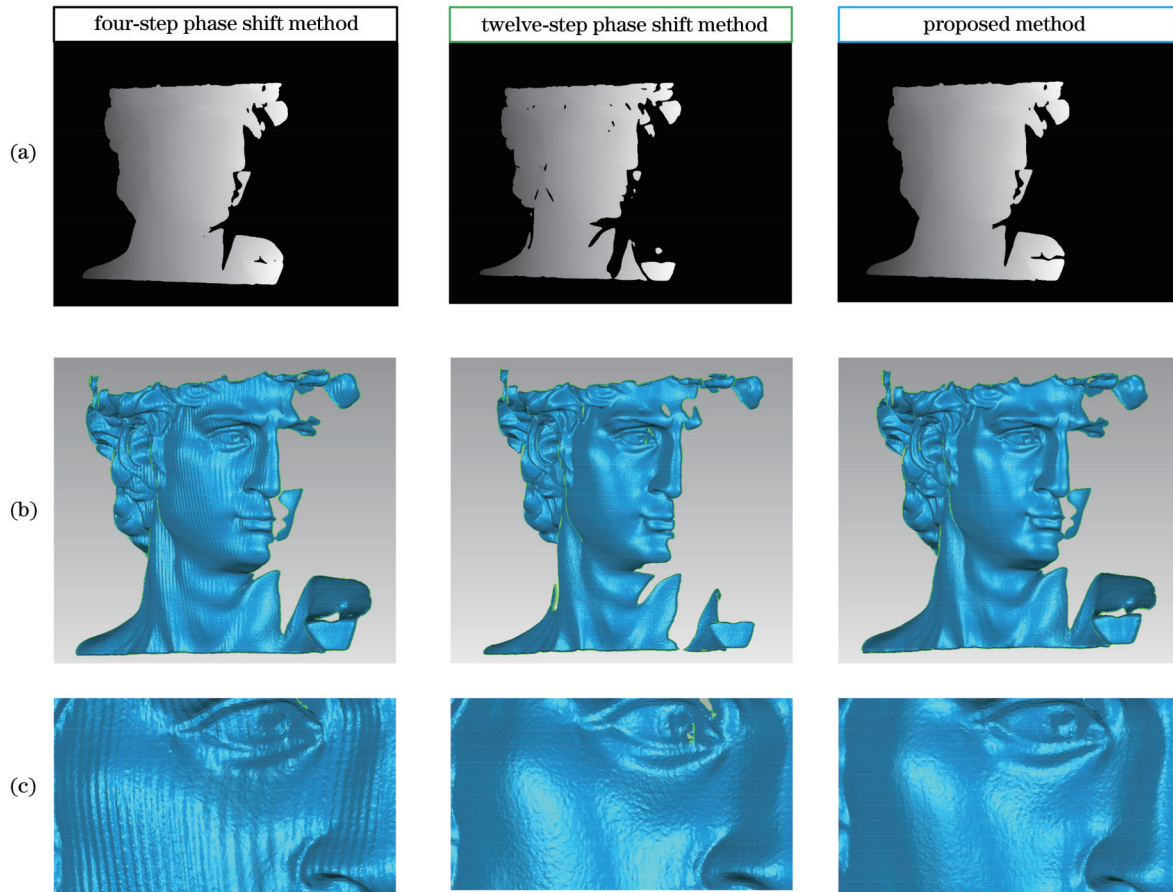


图 8 石膏头像重建结果。(a)绝对相位;(b)重建结果;(c)局部重建结果

Fig. 8 Reconstruction results of plaster head. (a) Absolute phase; (b) reconstruction results; (c) local reconstruction results

表 3 标定板直线拟合误差分析结果

Table 3 Analysis results of straight line fitting error of calibration plate

Method	RMSE /mm	SSE /mm
Four-step phase shift	0.1310	3.401
Twelve-step phase shift	0.1169	2.708
Proposed	0.1206	2.883

纹,通过投影二值条纹获得被测物体的调制信息,将采集回来的二值条纹进行二进制叠加,以此过程代替直接投影传统正弦条纹,从根本上降低系统非线性伽马效应所带来的测量误差,并将该方法结合四步相移方法,利用互补格雷码方法辅助相位展开。通过与传统四步相移方法和十二步相移方法进行对比实验,发现本文方法的测量精度明显高于传统四步相移方法,且明显削弱了非线性的影响。诸如十二步相移方法等多步相移方法虽然可以较好地避免非线性影响产生的测量误差,但是成倍增加的相移步数导致测量效率明显降低。本文方法既保留了四步相移方法的优点,又达到了十二步相移方法的类似效果。虽然本文方法增加了一定的投影条纹数量,但是相比于数字投影仪投影灰度条纹每秒上百帧的速度,投影二值条纹可以提升

至每秒数千帧的投影速度,依然有效地提高了投影效率。本文方法相比于传统方法在投影条纹数量上有不足之处,需要后续进行研究以降低二进制编码条纹的总体投影条纹数量。综上所述,使用二进制编码条纹代替灰度正弦条纹是一种有意义的研究思路,且能应用于实际三维测量。

参 考 文 献

- [1] 苏显渝,张启灿,陈文静.结构光三维成像技术[J].中国激光,2014,41(2):0209001.
Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
- [2] 陆丽莲,吴周杰,张启灿.基于错位格雷码的动态三维形貌测量方法[J].光学学报,2022,42(5):0512005.
Lu L L, Wu Z J, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional shape measurement method based on misaligned gray code[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0512005.
- [3] Song Z, Jiang H L, Lin H B, et al. A high dynamic range structured light means for the 3D measurement of specular surface[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 95: 8-16.
- [4] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. Real-time high dynamic range 3D measurement using fringe projection[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 24363-24378.
- [5] 张海花,李勇,张启灿.基于旋转光栅投影的动态三维形貌测量方法[J].光学学报,2021,41(23):0312005.
Zhang H H, Li Y, Zhang Q C. Dynamic 3D shape measurement

- based on rotating grating projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 0312005.
- [6] 侯冠宇, 吴斌, 何荣芳, 等. 基于双目光栅重建和纹理映射的缺陷三维测量方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0712003.
Hou G Y, Wu B, He R F, et al. Three-dimensional measurement method of defects based on binocular grating reconstruction and texture mapping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0712003.
- [7] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(1): 156-160.
- [8] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [9] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [10] 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.
- [11] 樊敏, 张启灿. 相移条纹非线性相位误差补偿方法[J]. *激光杂志*, 2019, 40(11): 16-21.
Fan M, Zhang Q C. Nonlinear phase error compensation method for phase-shifting fringe[J]. *Laser Journal*, 2019, 40(11): 16-21.
- [12] Zhang S, Yau S T. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(1): 36-43.
- [13] Su X Y, Zhou W S, von Bally G, et al. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. *Optics Communications*, 1992, 94(6): 561-573.
- [14] Huang P S, Hu Q J, Chiang F P. Double three-step phase-shifting algorithm[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4503-4509.
- [15] 郑东亮, 达飞鹏. 双步相移光栅投影测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512004.
Zheng D L, Da F P. Double-step phase-shifting algorithm for fringe projection measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512004.
- [16] 张启灿, 吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303004.
Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303004.
- [17] 浦婷婷, 吴周杰, 张启灿. 基于格雷码和相移算法的动态三维测量技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0512001.
Pu T T, Wu Z J, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional measurement technology based on gray code and phase-shifting algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0512001.
- [18] 孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1947-1951.
Sun X Z, Su X Y, Zou X P. Phase-unwrapping based on complementary structured light binary code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1947-1951.

Three-Dimensional Measurement Method Based on Binary Coded Fringes

Liu Jia^{1,2}, Lu Changqiu¹, Wen Jie¹, Xiao Yuqian¹, Yan Fei^{1,2}, Liu Yinpings^{3*}

¹*School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

²*Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

³*School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China*

Abstract

Objective In the three-dimensional measurement technology of structured light, traditional sinusoidal fringes are lost due to the nonlinear gamma effect of digital micromirror projectors and industrial cameras, which results in phase errors and thus reduces the measurement accuracy and effect. With only two gray values, the binary fringe is not affected by the nonlinear system and can greatly improve the projection speed, and hence, it is widely studied by scholars both at home and abroad. Binary fringe defocused projection technology is widely used in three-dimensional topography measurement. In this technique, the gray sinusoidal fringes of eight bits are discretized and quantized into the binary fringes of one bit, and the sinusoidal fringes are obtained at the imaging end by the micro defocus of the projector. This method can reduce the nonlinear effect of the projector and significantly improve the measurement speed, but it can hardly grasp the defocus degree and will reduce the depth range of measurement. Given the advantages of binary fringes, this paper proposes a measurement method based on binary coded fringes. This method can combine the binary fringes with the phase-shifting technique without defocused projection to improve the measurement accuracy and effect.

Methods This paper proposes a measurement method based on binary coded fringes. The modulation information of the measured object surface is obtained by the projection of multiple binary fringes, and then the sinusoidal fringes are generated by the binary superposition of binary fringes. The projection of binary fringes can avoid the direct projection of sinusoidal fringes and reduce the influence of the nonlinear system. First, the gray value of the traditional sinusoidal fringe that changes sinusoidally in a period is sampled to obtain the discrete decimal gray value of the sinusoidal fringe. The gray

value is encoded in binary, and all the code words of the same rank of binary encoding are combined separately to generate binary fringes. Second, the sequential projection is carried out by the digital projector, and the collected fringes are superimposed in binary to generate the sinusoidal fringes modulated by the height information of the object to replace the process of directly projecting the traditional gray sinusoidal fringes. Third, the wrapped phase is obtained by the combination of the proposed method and the four-step phase-shifting technique, and the phase is unwrapped by the complementary Gray-code method to obtain the absolute phase. Through projector and camera calibration, the absolute phase is mapped to three-dimensional point cloud data.

Results and Discussions To verify the superiority of the three-dimensional measurement method based on binary coded fringes, this paper uses the binary coded fringe method combined with the four-step phase-shifting technique to measure different objects and carries out a comparison experiment with the traditional four-step phase-shifting method and twelve-step phase-shifting method. In terms of accuracy evaluation, the standard sphere with a diameter of 50.8140 mm is measured, and the local point cloud data is fitted. The average distance between the point cloud data of the proposed method and the fitted standard sphere is 0.0697 mm, while that of the traditional method is 0.1288 mm. Compared with the results of the traditional methods, the accuracy of the proposed method is significantly improved, and the average distance is reduced by 45.88%, as shown in Fig. 5 and Table 2. The measurement of the high-precision plane and the linear fitting of the local data show that the root mean square error (RMSE) of the proposed method is 0.1211 mm, and the sum of the squared error (SSE) is 2.922 mm, as shown in Fig. 7 and Table 3. By the measurement of large-depth objects, the proposed method greatly reduces the periodic errors caused by nonlinear influences compared with the traditional method based on four-step phase-shifting, and the effect is similar to that of the twelve-step phase-shifting method. The local reconstruction results are shown in Fig. 8.

Conclusions In this paper, a measurement method based on binary coded fringes is proposed. Multiple binary fringes are obtained by binary coding of the gray values within a sinusoidal period, and the modulation information of the measured object is obtained by binary fringe projection, and the collected binary fringes are superimposed in binary. This can replace the direct projection of traditional sinusoidal fringes and fundamentally reduce the measurement error caused by the nonlinear gamma effect. In addition, the proposed method is combined with the four-step phase-shifting method, and the complementary Gray-code method is used to assist in phase unwrapping. The comparison with the traditional four-step phase-shifting method and the twelve-step phase-shifting method demonstrates that the accuracy of the proposed method is significantly higher than that of the traditional four-step phase-shifting method, and on the basis of the principle of four-step phase shifting, the nonlinear effect is reduced. The proposed method not only retains the advantages of the four-step phase shifting but also achieves a similar effect as the twelve-step phase shifting method. Although the proposed method increases the number of projected fringes to a certain extent, it still effectively improves the projection efficiency compared with the projection of gray sinusoidal fringes. However, compared with the traditional method, the proposed method has some shortcomings in the projection. Further research is required to reduce the overall projection number of binary coded fringes. In conclusion, replacing gray sinusoidal fringes with binary coded fringes is a meaningful research idea and can be applied to actual three-dimensional measurement.

Key words measurement; phase shifting technique; nonlinear error; binary fringe; binary