

一种二值编码结合误差扩散算法的三维测量方法

严飞^{1,2}, 孙成¹, 吴佩悦¹, 路长秋¹, 文杰¹, 刘佳^{1,2*}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

摘要 二值条纹投影技术能够避免三维测量系统中非线性影响,降低测量误差,为了优化二值条纹正弦质量,提高测量精度,提出了一种二值编码结合误差扩散的三维测量方法。以单周期正弦条纹特定方式采样点作为二值编码对象,在时间域上对采样点进行等区间划分,使用误差扩散算法对各区间对应的灰度区域进行处理生成相应的二值图像,在投影仪聚焦投影状态下代替传统正弦条纹获取较高质量的相位信息。在此基础上,采用“S”形路径扫描改善了条纹正弦性。实验结果表明,所提方法生成的正弦条纹相比传统四步相移算法,能够有效提高测量精度,具有良好的正弦性。对比实验证实,所提算法优化后相位误差减少 24.19%,正弦条纹质量进一步得到提升。

关键词 三维测量; 二值编码; 误差扩散; 相移技术

中图分类号 TD172

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231050

1 引言

伴随着工业的发展以及相关科技水平的提高,三维测量技术广泛应用于生物医学、机器视觉、工业生产质量检测、文物重建、增强现实(AR)旅游等领域^[1-4]。条纹投影轮廓术^[5-6]作为一种主动式光学三维测量技术,具有精度高、非接触、成本低、结构简单、测量速度快等优点,可以向测量物体表面投射条纹,从采集的变形条纹图像获取相位信息,并对物体进行三维重建。传统方法投射 8 位正弦条纹,极大地影响整个系统的测量速度,同时,数字投影仪自身设置的 Gamma 值使得投射的正弦条纹失去了良好的正弦性,因此,在测量过程中引入非线性误差。二值条纹灰度值只有 0 和 255,可以有效避免投影仪的非线性效应,并且数字投影仪投射二值条纹的速率能够满足高速测量的需求,因此二值条纹投影技术在条纹投影三维测量领域得到了广泛关注,近年来,使用二值条纹代替传统正弦条纹进行三维测量成为一种新的研究方向。

二值条纹调制是一种能够解决方波二值条纹高次谐波无法完全滤除问题的技术,通过对条纹图像横纵方向进行处理,调制后的二值条纹在离焦的状态下产生理想的正弦条纹。双极双边调制(BDEM)技术能够产生理想 PWM 波形在电力电子领域得到广泛应用。Silva 等^[7]利用 BDEM 模型调制三个二进制 PWM 图案到 RGB 图像的红、绿、蓝三通道,生成的彩色 PWM 图

案在轻微离焦状态下,可以消除高次谐波,在减少采集图案数量的同时改善了相位质量,但整个过程忽视了投影仪和相机的色谱影响。编码二值条纹^[8-11]方法的提出很大程度上解决了脉宽调制二值条纹在离焦状态下图像质量降低导致的相位信息丢失等问题。Ayubi 等^[12]将单周期正弦条纹 0~255 灰度值的点与 8 张二进制图像上对应的点进行叠加,正弦图像通过 8 张二进制图像叠加表示,但实际测量中模糊的条纹可能会引起编码错误,进而导致测量范围受到系统景深的限制。无论是脉宽调制还是编码二值条纹,都是对条纹在一维空间进行优化,实际应用中受到条纹间距的限制,在条纹周期较大时效果较差,随着抖动技术的运用,上述情况得到改善,在条纹间距较大的情况下也能够保持良好测量精度。Wang 等^[13]使用 Bayer 抖动算法将正弦图案处理成二值抖动图案,在轻微离焦和宽条纹间距的条件下,投射的二值条纹依旧表现出良好的正弦性,但 Bayer 有序抖动算法对正弦条纹图案的周期性和对称性产生一定程度上的影响。误差扩散算法^[14-15]是一种图像半色调处理技术,通过将误差扩散到周围像素点来逐渐逼近目标灰度值,从而实现图像半色调处理效果。典型的 Floyd-Steinberg 抖动^[16]和 Sierra Lite^[17]抖动两者相比 Bayer 抖动精度有所提高,正弦周期性也得到一定程度的提高,但在实际测量中,这两种算法在条纹周期较小的情况下,处理效果仍需要进一步优化。

收稿日期: 2023-05-26; 修回日期: 2023-06-28; 录用日期: 2023-07-12; 网络首发日期: 2023-08-02

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: *liujia@nuist.edu.cn

本文提出一种二值编码和基于 Sierra Lite 误差扩散算法结合的条纹设计方法, 对一个周期的连续正弦条纹进行一定规律的采样, 再将离散的像素点进行后续算法处理, 所获得的二值条纹通过数字投影仪投射物体表面, 将采集到的经过测量物体调制的条纹图像进行系数叠加, 从而获取包含被测物体高度信息的正弦条纹。同时在此基础上, 验证“S”形路径扫描^[18]能够进一步优化所得正弦条纹的质量。在整个物体测量过程中, 投影仪和相机处于聚焦状态, 因此相比二值条纹离焦投影技术, 本文所提方法在深度测量范围也具有有一定优势。

2 基本原理

2.1 四步相移算法

相移算法^[19]具有精度高、运算速度快、不受测量物体表面剧烈变化影响等优势, 因而在三维测量领域得到广泛使用。本文使用四步相移算法求解相位主值, 将四幅相位偏移均为 $\pi/2$ 的正弦条纹通过数字投影仪投射到物体表面, 使用相机采集包含测量物体高度信息的变形条纹, 对采集到的图像进行相应运算即可获取相位主值。四幅相移条纹图像可表示为

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{2\pi \times (n-1)}{4} \right], n = 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

式中: $A(x, y)$ 为背景光强; $B(x, y)$ 为反射光强; $\varphi(x, y)$ 为待求相位主值。使用下式计算相位主值。

$$\varphi(x, y) = -\arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^4 I_n(x, y) \sin \left(\frac{2n\pi}{4} \right)}{\sum_{n=1}^4 I_n(x, y) \cos \left(\frac{2n\pi}{4} \right)} \right]. \quad (2)$$

后续基于互补格雷码相位展开方法将值域在 $(-\pi, +\pi]$ 的截断相位恢复成连续相位。

2.2 二值编码结合误差扩散原理

误差扩散是一种邻域处理算法, 将灰度图像像素按设定阈值量化为 0 或 255 两种像素值, 同时将量化后与原像素的误差按特定比例系数扩散到当前位置相邻像素上, 经过后续处理得到二值图案。

误差扩散算法的原理可表示为

$$I_{out}(i, j) = I_{in}(i, j) + \sum_{m, n \in S} h(m, n) e(i-m, j-n), \quad (3)$$

式中: $I_{out}(i, j)$ 为误差扩散后的图像; $I_{in}(i, j)$ 为原始灰度图像; $e(i, j)$ 为量化误差; $h(m, n)$ 为将量化误差按一定比例扩散至相邻像素点的核函数; S 为误差扩散处理范围大小。

整个条纹设计过程分为采样与量化两个部分, 首先对周期为 T 的连续标准正弦函数 $I_s(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left(\frac{2\pi x}{T} \right)$ 采样 T 个灰度值对称相等的离散点 $x = -\frac{T}{4} + n - 0.5 (n = 1, 2, 3, \dots, T)$, 然后按阈值 $x_k = -\frac{T}{8} + \frac{T}{8} m (m = 0, 1, \dots, 6)$ 在时间域上将离散点划分为 8 个相等区间, 8 个时间区域对应 4 个灰度值区间, 取每个灰度区间上下边界值之差的一半作为该区间的量化阈值, 最后进行误差扩散算法等后续处理获得 4 幅二值图像, 将 4 幅二值以下式进行叠加, 低通滤波后可获得正弦图像。

$$I_c = \sum_{n=1}^4 (B_n - B) \times \left\{ \sin \left[\frac{2\pi}{T} \times \left(-\frac{T}{4} + \frac{T}{8} n \right) \right] - \sin \left[\frac{2\pi}{T} \times \left(-\frac{T}{4} + \frac{T}{8} (n-1) \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中: B_n 为第 n 个灰度区间对应的二值图像; B 为黑色图像, 消除实际采集过程中黑色光强值不为 0 带来的测量误差; T 为正弦条纹周期。

通过上述抖动条纹叠加代替传统方法中使用正弦条纹进行测量, 一方面避免了非线性误差对测量精度的影响, 另一方面使用数字投影仪投射二值条纹相比投射正弦条纹, 投射速率大幅提升。以单周期 $T=16$ pixel 正弦条纹图像为例, 编码原理如图 1 所示, 划分后每个时间区间包含 2 个正弦离散像素, 整个 0~1 的灰度值被划分为 $I_{s1} \in [0, I_s(-2))$, $I_{s2} \in [I_s(-2), I_s(0))$, $I_{s3} \in [I_s(0), I_s(2))$, $I_{s4} \in [I_s(2), 1]$ 等四个区间, 则第一个区间 I_{s1} 内的量化误差为

$$e_1(i, j) = \begin{cases} I_{s1}(i, j), & I_{s1}(i, j) \leq \frac{I_s(-2) - 0}{2} \\ I_{s1}(i, j) - \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left(-\frac{\pi}{4} \right) \right], & I_{s1}(i, j) > \frac{I_s(-2) - 0}{2} \end{cases} \quad (5)$$

同理区间 I_{s2} 、 I_{s3} 、 I_{s4} 的量化误差分别为

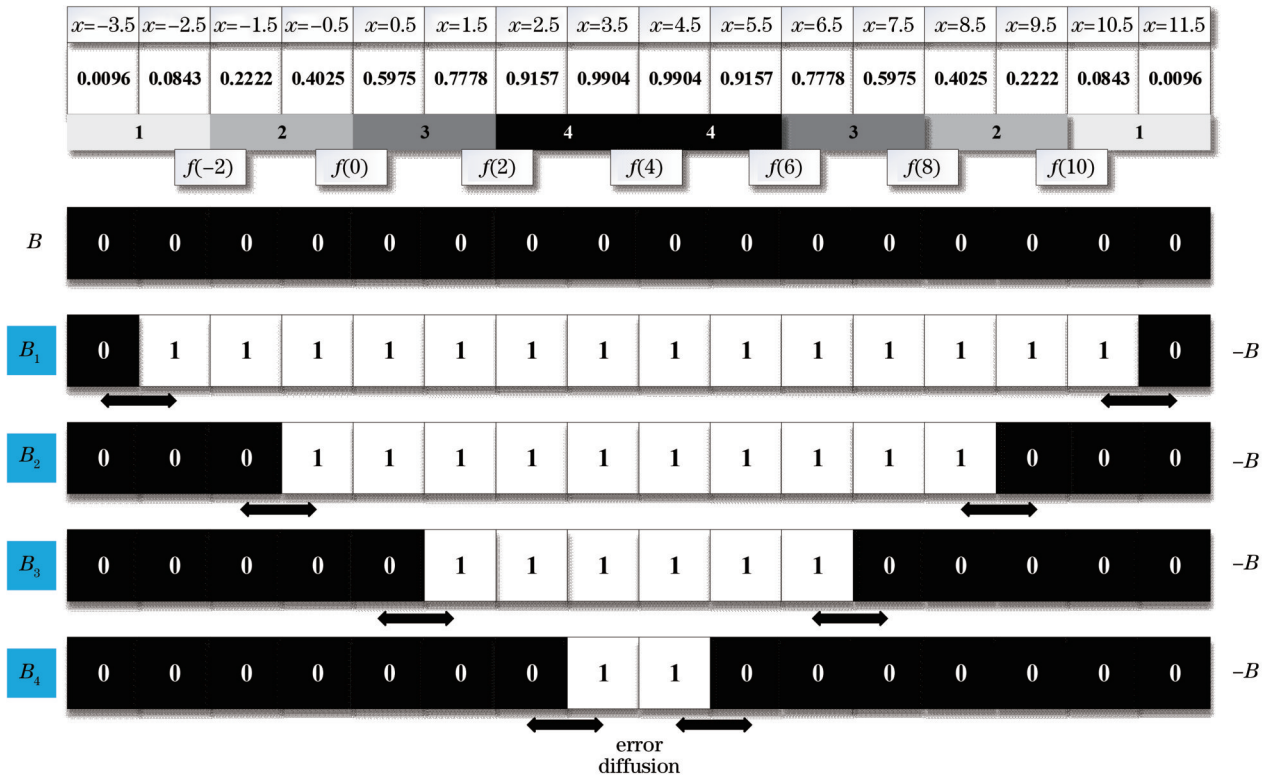


图 1 二值编码结合误差扩散原理
Fig. 1 Principle of binary coding combined with error diffusion

$$e_2(i, j) = \begin{cases} I_{s2}(i, j) - \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left(-\frac{\pi}{4}\right) \right], I_{s2}(i, j) \leq \frac{I_s(0) - I_s(-2)}{2} \\ I_{s2}(i, j) - \frac{1}{2}, I_{s2}(i, j) > \frac{I_s(0) - I_s(-2)}{2} \end{cases}, \quad (6)$$

$$e_3(i, j) = \begin{cases} I_{s3}(i, j) - \frac{1}{2}, I_{s3}(i, j) \leq \frac{I_s(2) - I_s(0)}{2} \\ I_{s3}(i, j) - \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \right], I_{s3}(i, j) > \frac{I_s(2) - I_s(0)}{2} \end{cases}, \quad (7)$$

$$e_4(i, j) = \begin{cases} I_{s4}(i, j) - \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \right], I_{s4}(i, j) \leq \frac{1 - I_s(2)}{2} \\ I_{s4}(i, j) - 1, I_{s4}(i, j) > \frac{1 - I_s(2)}{2} \end{cases}. \quad (8)$$

本文使用的 Sierra Lite 误差扩散核函数可表示为

$$h_{s0}(m, n) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} - & * & 2 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中：“-”表示算法已处理的像素点；“*”表示算法当前处理的像素点；与之相邻的数值为分配给周围像素点的量化误差比例。即将 2/4 的量化误差分配给当前像素点的右方相邻像素点，左下方和下相邻像素点各分配 1/4 的量化误差。传统误差扩散算法对于像素点处理的路径以“从左到右，从上到下”的方式，导致抖动图像的对称性相对较差，为了优化抖动图像的质量，提高

测量精度，本文修改算法扩散路径，当第一行最后一个像素点处理完成后，处理当前像素点的正下方像素点，从第二行末端像素点向左扩散，当第二行第一个像素点处理完成后，处理该像素点的正下方像素点同时向右扩散，即“奇数行向右扩散，偶数行向左扩散”，整体路径形成“S”形，图 3 为扩散路径示意图。偶数行的误差扩散核函数可表示为

$$h_{se}(m, n) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2 & * & - \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

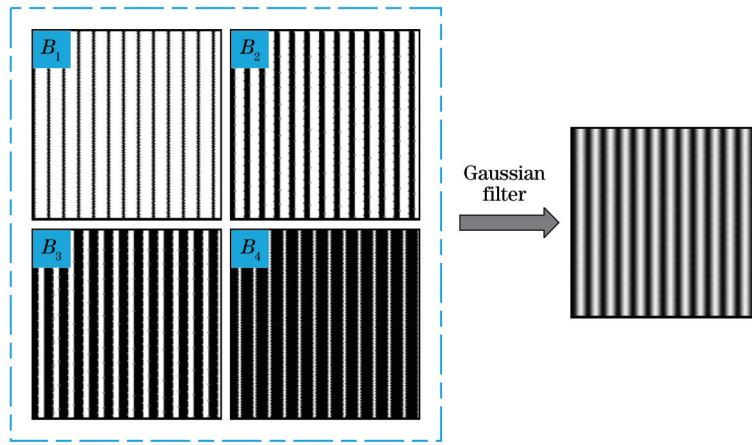


图 2 二值编码结合误差扩散示意图

Fig. 2 Schematic diagram of binary coding combined with error diffusion

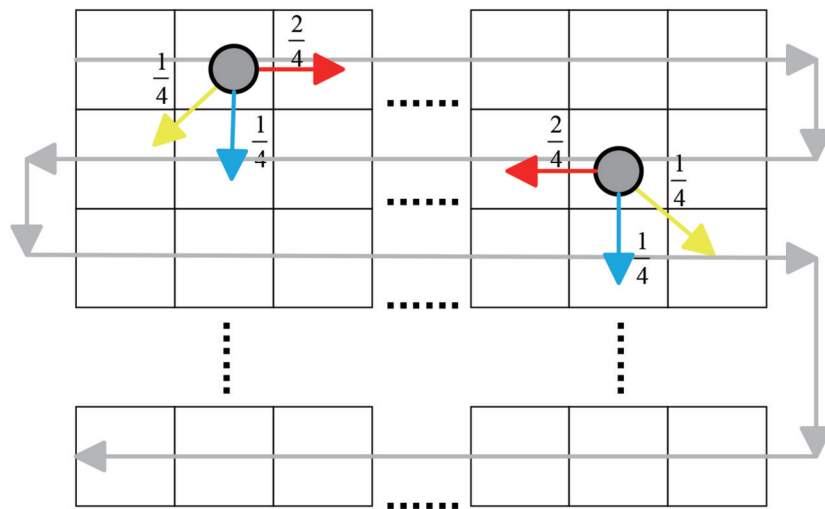


图 3 “S”形路径扫描

Fig. 3 S-shaped path scanning

3 模拟仿真

为了评估二值编码与误差扩散相结合生成条纹相位展开质量,验证采用“S”形路径扫描能够减少正弦条纹相位误差,本文设计不同周期的条纹 $T=16, 32, 48, \dots, 112$ pixel 进行仿真模拟,条纹图像分辨率为 $912 \text{ pixel} \times 1140 \text{ pixel}$,选取模板大小 $m=5$,标准差为 $\sigma = \frac{5}{3}$ 的高斯滤波器模拟实际测量系统低通滤波作用。采用四步相移算法计算截断相位,后续相位展开获得连续、完整的绝对相位。

图 4(a)、(b)分别为结合“自左到右,自上到下”路径扫描方式与“S”形路径扫描方式生成的周期 $T=32$ pixel 的二值条纹图像。传统路径扫描生成的二值条纹,条纹分布整体相对均匀,但对称性较差,可能存在局部细节丢失,一定程度上增大了相位误差,因此最终获得的正弦条纹质量能够进一步优化。“S”形路径扫描生成的二值条纹,条纹分布对称性得到改善,减少

了误差向下、向右累加对图像质量的影响。图 4(e)、(f)为叠加、高斯滤波后的条纹图像。

将同周期标准正弦条纹解出的绝对相位作为理想值,图 5(a)为理想截断相位 400 行部分像素,图 5(b)为相位展开后的连续相位。计算两种路径扫描方式在投影仪聚焦状态和离焦状态下获得的正弦条纹求解出的绝对相位的均方根误差(RMSE),评估正弦条纹相位质量,同时与传统二值离焦技术进行对比,计算结果如图 6 所示。两种方法在投影仪聚焦状态和离焦状态下对比传统二值离焦均能够获得更高质量的正弦条纹,获得的正弦条纹在各个周期下都具有较小的相位误差且误差大小近似,在条纹周期较大($T=112$ pixel)和较小($T=16$ pixel)的情况下仍然保持良好的绝对相位,尤其在周期较大($T=112$ pixel)时,条纹相位误差相对其他周期数值最小,因此本文所提方法与优化方法都具有很强的适应性。仿真结果表明,结合“S”形路径扫描方式对应的条纹相位质量优于传统路径扫描方式与二值离焦。

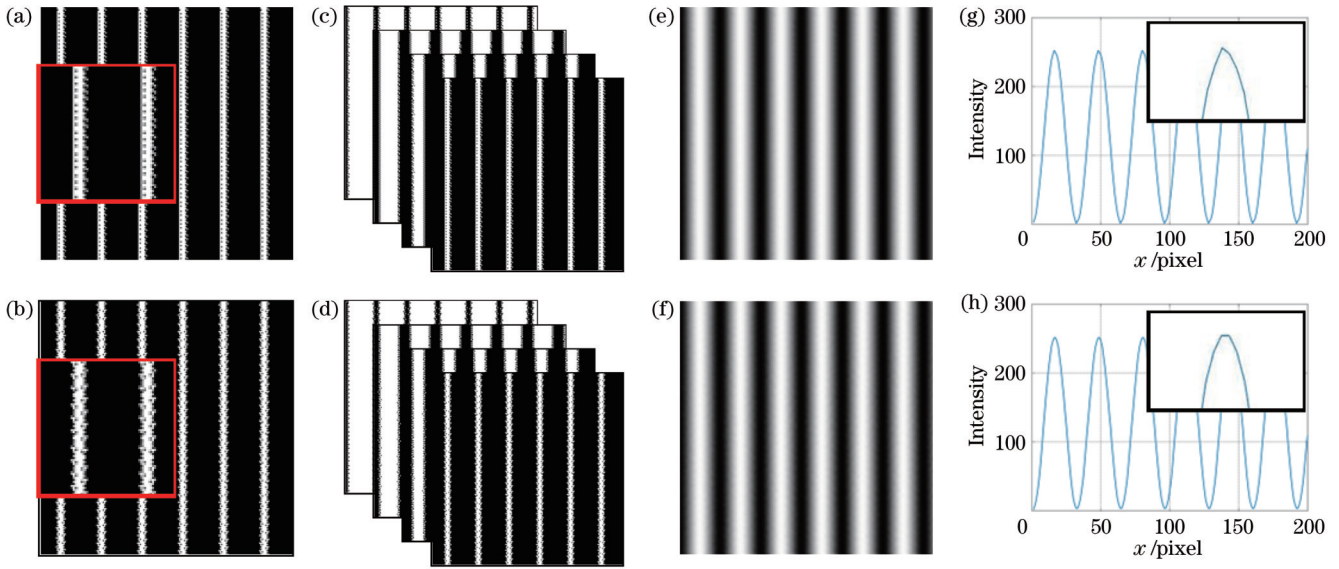


图 4 条纹对比。(a)(b)图像局部放大;(c)(d)四幅二值图像;(e)(f)高斯滤波图像;(g)(h)滤波图像灰度值

Fig. 4 Contrast of fringes. (a)(b) Local enlargement of images; (c)(d) four binary images; (e)(f) Gaussian filter image; (g)(h) grayscale value of Gaussian filter image

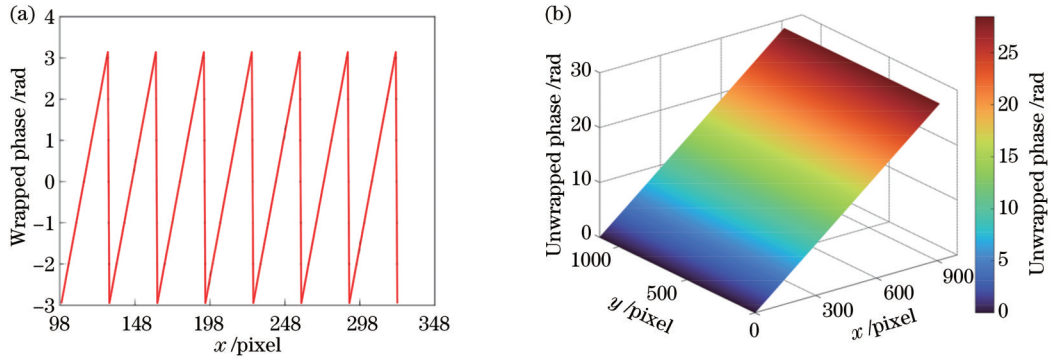


图 5 标准正弦相位求解。(a)截断相位第 400 行部分像素;(b)绝对相位

Fig. 5 Solution for standard sinusoidal phase. (a) Wrapped phase of the 400th row partial pixel; (b) unwrapped phase

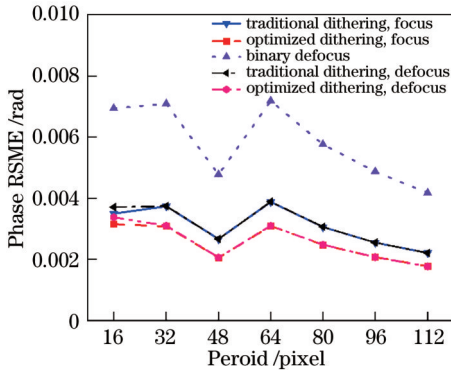


图 6 不同周期均方根误差仿真对比

Fig. 6 Simulation comparison of phase root mean square error with different periods

4 实验与分析

本文实验验证基于实验室搭建的三维测量系统,该系统由 DLP 投影仪(Light Graftor 4500)和工业相机

(Point Grey FL3-U3-13Y3M-C),以及负责图像捕获、处理的计算机构成。DLP 投影仪分辨率为 912 pixel×1140 pixel,输出分辨率为 1280 pixel×800 pixel,工业相机分辨率为 1280 pixel×1024 pixel。

4.1 相位质量对比实验

为了对比结合两种路径扫描方式在实际测量时正弦条纹相位质量,将高精度标定板作为投影平面,以二十步相移正弦条纹计算出的相位值代替仿真中理想相位,二值编码结合传统路径扫描和结合“S”形路径扫描误差扩散算法生成不同周期条纹,计算其在投影仪聚焦与离焦状态下相位展开后与二十步相移算法相位之差的均方根误差,验证仿真结果。测量结果如图 7 所示,实验数据表明,采用“S”形路径扫描生成的正弦条纹具有更好的相位质量,尤其在条纹周期较小($T=16, 32$ pixel)的情况下,优化方法后求解的相位均方根误差分别为 0.0158 rad 和 0.0075 rad,相比修改扫描路径前分别提升了 14.37% 和 24.19%。优化后的方法

能够明显减少相位误差,同时,在绝大数周期下,本文所提算法计算出的相位误差值较低,且在聚焦与离焦状态下各周期相位误差大小接近且均小于传统二值离焦计算结果,实验结果与仿真结果一致。

4.2 正弦性对比实验

为了验证本文所提方法与优化后的方法相比传统四步相移条纹在实际测量中能保持良好正弦性,同时评估三种方法在周期较大与较小情况下的正弦适应性。将条纹周期 $T=32, 96$ pixel 的四步相移条纹和本文所提两种方法生成的二值条纹分别投射到高精度棋盘格并用工业相机进行采集(图 8)。选取采集、叠加后图片的 810 行的 247~516 pixel 共计 270 个像素点进行正弦拟合,拟合结果如图 9 所示,条纹正弦拟合误差分析结果如表 1 所示。本文所提方法与优化后的方法

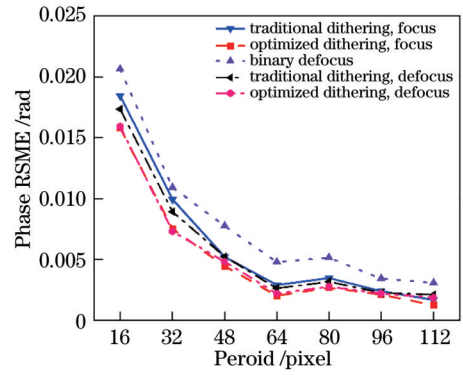


图 7 不同周期均方根误差实验对比

Fig. 7 Experimental comparison of phase root-mean-square error with different periods

在条纹周期较大和较小的情况下,对比传统四步相移

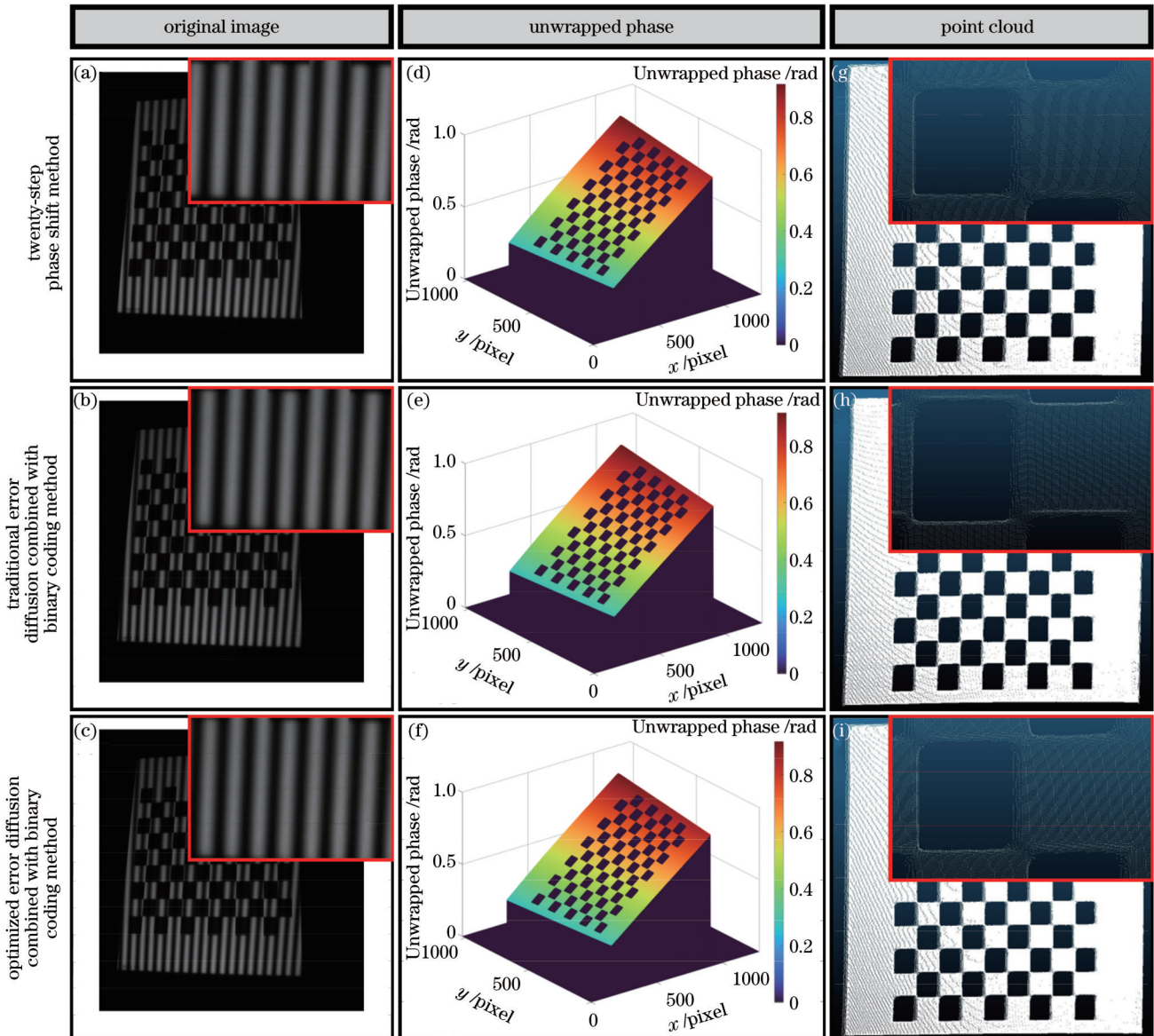


图 8 标定板相位求解实验结果。(a)~(c)采集图片;(d)~(f)绝对相位;(g)~(i)标定板点云

Fig. 8 Experimental results of phase solving calibration plates. (a)~(c) Captured pictures; (d)~(f) unwrapped phase; (g)~(i) point cloud of calibration plate

方法都能够保持良好的正线性,由表 1 可知,结合优化扫描路径后在条纹周期 $T=32, 96$ pixel 情况下的 RMSE 分别为 0.87457 和 1.0465, 误差平方和 (SSE)

分别为 192.75 和 289.12, 均优于四步相移算法与结合传统路径扫描。

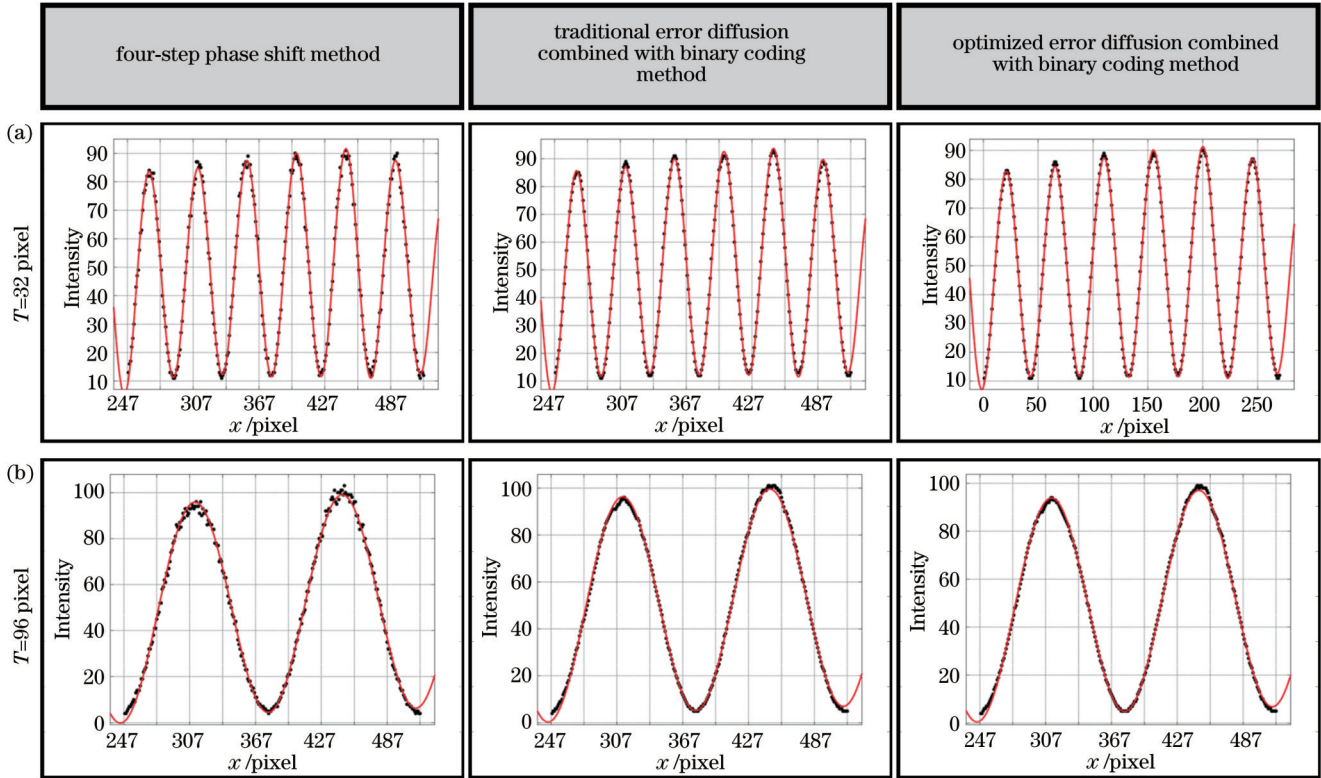


图 9 正弦拟合结果。(a) $T=32$ pixel; (b) $T=96$ pixel

Fig. 9 Results of sinusoidal fitting. (a) $T=32$ pixel; (b) $T=96$ pixel

表 1 正弦拟合误差分析

Table 1 Sinusoidal fitting error analysis

Fringe period	Four-step phase shift method		Traditional error diffusion combined with binary coding method		Optimized error diffusion combined with binary coding method	
	RMSE	SSE	RMSE	SSE	RMSE	SSE
$T=32$ pixel	1.6263	666.47	1.0293	267.01	0.8745	192.75
$T=96$ pixel	1.6501	718.86	1.1816	368.56	1.0465	289.12

4.3 精度对比实验

为了评估本文所提方法与优化后的方法的精度,将上述三种方法生成的条纹投射到直径为 50.8140 mm 的标准精度球,进行后续处理获得的点云数据如图 10(a)所示。对局部点云进行球体拟合,精度分析如表 2 所示。所提方法与优化方法拟合球体直径分别为 50.8188 mm 和 50.8178 mm,计算出两种方法的点云数据与同球心、直径为 50.8140 mm 标准球

体的平均距离分别为 0.008043 mm 和 0.006544 mm,并且三种方法获得的点云数据离散程度相似,分布均匀。因此,在本文所提方法精度优于四步相移的基础上,优化方案能够进一步提高测量精度。

4.4 深度物体非线性对比实验

为了对比三种方法在实际测量中的效果,以十二步相移重建结果作为参考,本实验将深度较大的大卫石膏雕像作为测量对象,整个测量过程中,投影仪和相

表 2 拟合球精度分析

Table 2 fitting sphere accuracy analysis

unit: mm

Method	Diameter	Average distance	Standard deviation
Four-step phase shift	50.7805	-0.008973	0.092646
Traditional error diffusion combined with binary coding	50.8188	0.008043	0.094340
Optimized error diffusion combined with binary coding	50.8178	0.006544	0.093207

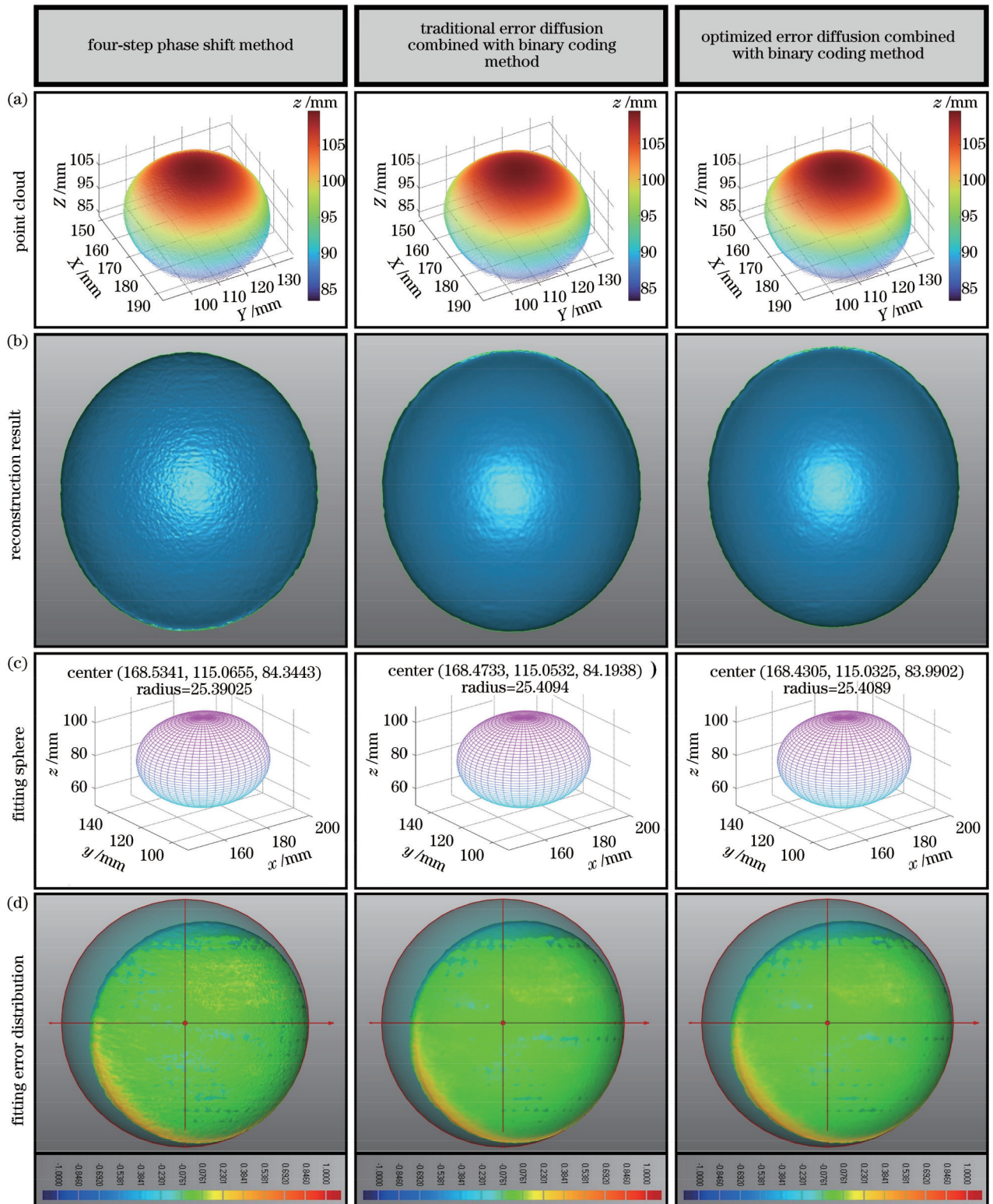


图 10 精度球测量结果。(a)精度球点云;(b)重建结果;(c)拟合球数据;(d)拟合误差分布

Fig. 10 Measurement results of precision ball. (a) Point cloud of precision ball; (b) reconstruction results; (c) fitted sphere data; (d) fitting error distribution

机保持聚焦状态。测量结果如图 11 所示。4 种方法在实际测量中,都能够得到较高质量的绝对相位,本文所提优化后的方案重建物体具有光滑的表面,效果与传统十二步相移接近,在整个物体重建过程中能够有效

避免非线性误差带来的影响,未优化方案重建物体表面局部区域存在些许波纹,重建效果一般,但优于传统四步相移结果。传统四步相移算法在实际测量中收到投影仪、相机 Gamma 效应的影响,重建物体表面不平

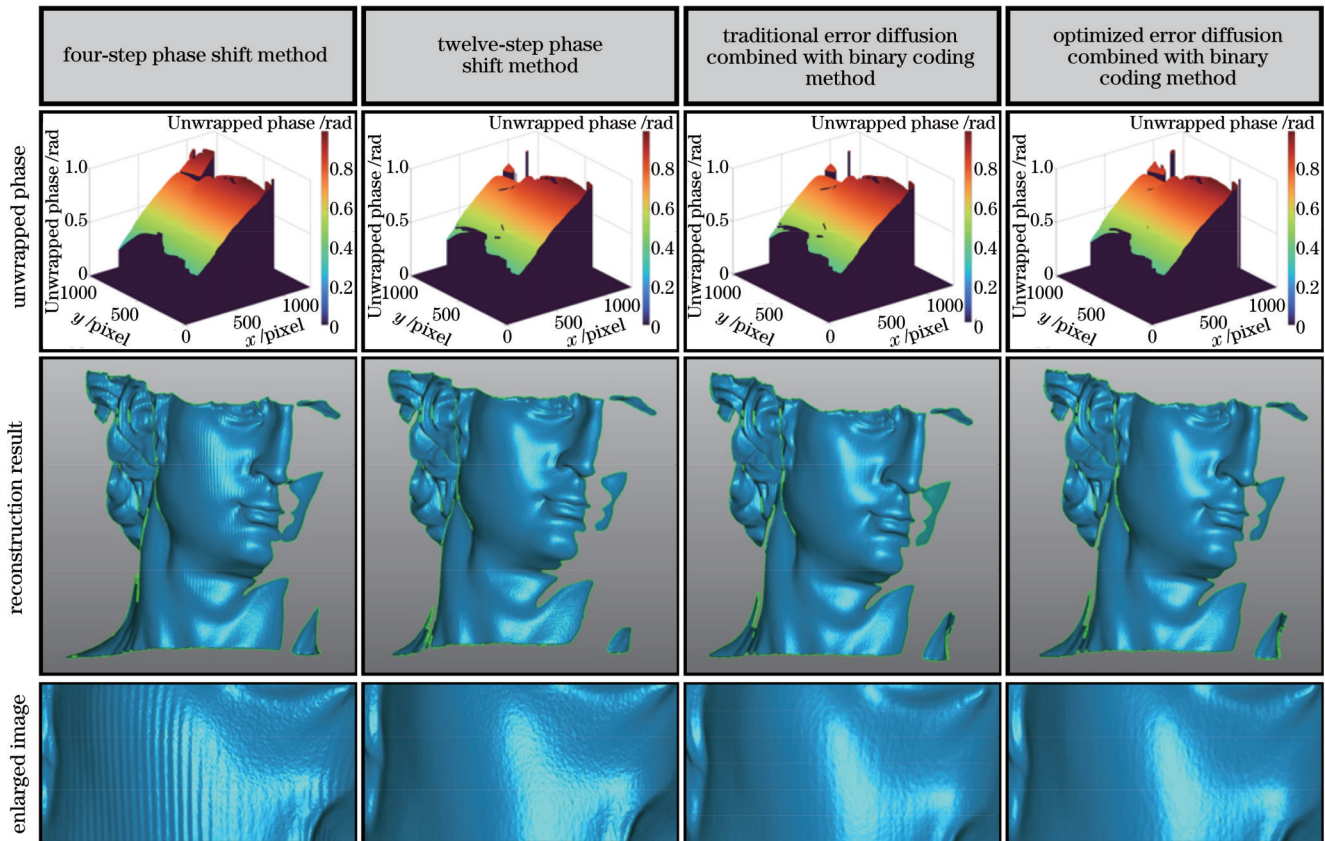


图 11 雕像重建结果。(a)绝对相位;(b)完整效果图;(c)局部放大图

Fig. 11 Reconstruction results of statue. (a) Unwrapped phase; (b) full renderings; (c) local enlarged view

滑,具有大量水波纹误差,重建效果较差。重建结果表明,二值编码结合“S”形路径扫描对深度较大的物体具有优异的效果。

5 结 论

本文将二值编码与误差扩散算法相结合,在三维测量系统低通滤波作用下获取高质量正弦条纹。通过仿真实验评估所提方法的正弦条纹质量,同时对比二值编码结合“S”形路径扫描与结合固有路径扫描误差扩散所得正弦条纹相位误差、正弦质量以及实际测量效果。仿真与实验均证明,采用“S”形路径扫描能够在所提算法良好测量结果的基础上,进一步提升正弦条纹的质量。所提方法使用4幅二值条纹叠加生成一幅正弦条纹,对比现有的二值编码技术,大幅减少了使用条纹的数量。因此,本文所提二值编码结合误差扩散算法在二值条纹三维测量领域提供了一种新的研究思路。

参 考 文 献

- [1] Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of 3-D shape measurement using optical methods[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are?[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [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] 肖虹, 徐晓. 基于双目线结构光的机车闸瓦厚度检测[J]. *光学与光电技术*, 2016, 14(3): 54-57.
Xiao H, Xu X. Thickness detection of the locomotive brake shoe based on the binocular line structure light[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2016, 14(3): 54-57.
- [5] 张海花, 李勇, 张启灿. 基于旋转光栅投影的动态三维面形测量方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 2312005.
Zhang H H, Li Y, Zhang Q C. Dynamic 3D shape measurement based on rotating grating projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 2312005.
- [6] 陈琦立, 陈文静. 发散圆形条纹投影的共轴三维测量方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(19): 1912004.
Chen Q L, Chen W J. Coaxial three-dimensional measurement method of divergent circular fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1912004.
- [7] Silva A, Flores J L, Munoz A, et al. Three-dimensional shape profiling by out-of-focus projection of colored pulse width modulation fringe patterns[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(18): 5198-5203.
- [8] 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.
- [9] Zhang S, Van Der Weide D, Oliver J. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9684-9689.
- [10] 刘佳, 路长秋, 文杰, 等. 基于二进制编码条纹的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(1): 0112004.
Liu J, Lu C Q, Wen J, et al. Three-dimensional measurement method based on binary coded fringe[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0112004.

- [11] 严飞, 祁健, 刘银萍, 等. 一种二值编码条纹聚焦投影的三维测量方法[J]. 光学学报, 2022, 42(22): 2212002.
Yan F, Qi J, Liu Y P, et al. Three-dimensional measurement method for binary-coded fringe focus projection[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(22): 2212002.
- [12] Ayubi G A, Di Martino J M, Alonso J R, et al. Three-dimensional profiling with binary fringes using phase-shifting interferometry algorithms[J]. Applied Optics, 2011, 50(2): 147-154.
- [13] Wang Y J, Zhang S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns[J]. Applied Optics, 2012, 51(27): 6631-6636.
- [14] Knox K T. Error diffusion: a theoretical view[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1913: 326-331.
- [15] Evans B L, Monga V, Damera-Venkata N. Variations on error diffusion: retrospectives and future trends[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5008: 371-389.
- [16] Floyd R W, Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial gray-scale[J]. Proceedings of the Society for Information Display, 1976, 17(2): 75-77.
- [17] 吕江昭, 达飞鹏, 郑东亮. 基于 Sierra Lite 抖动算法的散焦投影光栅测量[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0312004.
Lü J Z, Da F P, Zheng D L. Projector defocusing profilometry based on Sierra Lite dithering algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0312004.
- [18] 周佩, 朱江平, 荆海龙, 等. “S”型二元编码的正弦结构光模板设计与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 151203.
Zhou P, Zhu J P, Jing H L, et al. Design and experimental study of sinusoidal structured light mask with “S” shaped binary coding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 151203.
- [19] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.

A Three-Dimensional Measurement Method Based on Binary Coding Combined with Error Diffusion Algorithm

Yan Fei^{1,2}, Sun Cheng¹, Wu Peiyue¹, Lu Changqiu¹, Wen Jie¹, Liu Jia^{1,2*}

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

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

Abstract

Objective As an active optical three-dimensional (3D) measurement technique, fringe projection profilometry projects fringes onto the surface of the measured object, obtains phase information from the acquired deformed fringe image and performs 3D reconstruction. The traditional method employs standard sinusoidal fringes for measurement, which limits the projection speed of the digital projector and affects the measurement efficiency. Additionally, the Gamma value set by the projector makes the projected sinusoidal fringes lose their good sinusoidal properties and introduces nonlinear errors. Binary fringe has only two gray values to avoid nonlinear effect and improve projection efficiency. Therefore, binary fringe projection technologies have been widely concerned in the three-dimensional measurement of fringe projection. Among them, binary coding technology can solve the phase information loss caused by the decreased image quality during defocusing projection, and the error diffusion algorithm makes the fringe spacing no longer limited in practical applications. We propose a three-dimensional measurement method of binary coding combined with an error diffusion algorithm to optimize the sinusoidal quality of binary fringes and improve the measurement accuracy. On this basis, the serpentine path scanning method is adopted to further improve the sinusoidal fringes.

Methods We put forward a fringe design method combining binary coding and an error diffusion algorithm. The continuous standard sinusoidal fringes of a period are regularly sampled, the sampling points are divided into equal intervals in the time domain, and the gray scale regions corresponding to each interval are processed by the error diffusion algorithm to generate corresponding binary fringes. The binary fringe is projected onto the surface of the object by a digital projector, and the obtained fringe image modulated by the measured object is superimposed to obtain the sinusoidal fringe containing the height information of the measured object. To further improve the phase quality of sinusoidal fringes, we modify the traditional error diffusion path and utilize the path scanning method of "odd lines spreading to the right and even lines to the left" to calculate the pixels. This method leverages four binary fringes instead of one sinusoidal fringe and then combines the four-step phase shift algorithm with the complementary gray code method to carry out phase unwrapping and complete the 3D measurement under the focusing state of the projector.

Results and Discussions To verify the superiority of binary coding combined with the serpentine path scanning error

diffusion algorithm, we conduct several sets of comparative experiments. In the phase quality comparison experiment, with the high-precision calibration board, the sine stripes generated by the serpentine path scanning have a better phase quality. The phase error results under each fringe period are approximate under the focusing and de-focusing states. When the generated sinusoidal fringe has a fringe period of 32, the phase root mean square error (RMSE) error of the solution is 0.0075 rad. Compared with the error before modification, the measurement phase error of the proposed algorithm is reduced by 24.19%, and it is lower than that of the traditional binary defocusing technique (Fig. 7). In the sinusoidal comparison experiment, the optimized scheme is compared with the non-optimized scheme and the traditional four-step phase shift algorithm, and the obtained sinusoidal fringe is sinusoidally fitted. When the fringe periods are 32 pixel and 96 pixel, the RMSE of the optimized scheme is 0.87457 and 1.0465, and the sum squared error (SSE) is 192.75 and 289.12 respectively (Fig. 9 and Table 1). In the precision comparison experiment, the standard precision ball with a diameter of 50.8140 mm is measured. The optimized scheme fits the diameter of the ball to 50.8178 mm, and the average distance between the point cloud data and the standard ball with the same center and diameter of 50.8140 mm is 0.006544 mm (Fig. 10 and Table 2). In the contrast experiment of deep objects, the plaster whose surface depth changes greatly is measured, and the optimized scheme reconstruction surface is smooth, which can avoid the influence of nonlinear errors.

Conclusions By combining binary coding with an error diffusion algorithm, high-quality sinusoidal fringes are obtained under the action of low pass filter in the 3D measurement system. The measurement accuracy, phase error, sinusoidal mass, and actual measurement effect of sinusoidal fringe obtained by binary coding combined with serpentine path scanning and natural path scanning error diffusion are compared by simulation experiments. Simulation and experiments show that serpentine path scanning can further improve the quality of sinusoidal fringes based on the sound measurement results of the proposed algorithm. The proposed method employs the superposition of four binary fringes to generate a sinusoidal fringe, greatly reducing the fringe number compared with the existing binary coding technology. Therefore, the binary coding combined with the error diffusion algorithm proposed in our paper provides a new research approach in the three-dimensional measurement neighborhood of binary fringes.

Key words three-dimensional measurement; binary coding; error diffusion; phase shift technology