

光学学报

利用遗传算法优化误差扩散核参数的条纹二值编码方法研究

朱昌会¹, 周佩^{1,2}, 朱江平^{1,2*}, 游迪², 安世勇²

¹四川大学计算机(软件)学院, 四川 成都 610065;

²四川大学视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室, 四川 成都 610065

摘要 二值条纹投影图像在高速、高精度的三维面形测量领域应用广泛, 而提高二值编码条纹的正弦性对于提高三维面形的测量精度具有积极意义。传统及改进的误差扩散核多采用普适的扩散核对条纹图像进行二值编码, 较少考虑图像特征与投影离焦程度对相位提取精度的影响。首先利用遗传算法的思想来寻求最佳的误差扩散核系数, 然后通过线性拟合来构建与离焦程度以及正弦条纹周期相关的优化目标函数, 最后得到优化二值编码条纹正弦性的误差扩散核。仿真和实验分析结果表明, 在不同尺寸的窗口下, 不同周期有最小相位误差的误差扩散核且它们各不相同, 证实扩散核对图像的二值编码质量与图像特征有关。实验进一步证明, 大中小三种离焦程度下, 所提算法的相位误差较普适的 Floyd-Steinberg 扩散法可分别减小 43.86%、64.37% 和 50.10%, 所提算法的相位误差较改进的 Floyd-Steinberg 扩散法可分别减小 13.51%、18.48% 和 17.65%。

关键词 图像处理; 误差扩散; 二值编码; 遗传算法; 结构光模板

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2110002

Stripe Binary Encoding Method Using Genetic Algorithms to Optimize Kernel Parameters of Error Diffusion

Zhu Changhui¹, Zhou Pei^{1,2}, Zhu Jiangping^{1,2*}, You Di², An Shiyong²

¹College of Computer Science(software), Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

²National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract Binary fringe projection image is widely used in high speed and high precision 3D surface measurement, and improving the sinusoidal properties of binary coded fringe is of positive significance for improving the accuracy of 3D surface measurement. The traditional and improved error diffusion kernel mostly uses universal diffusion to check fringe image for binary coding, while the influence of image features and projective defocus degree on phase extraction accuracy is less considered. First, the genetic algorithm is used to find the better error diffusion kernel coefficient. Second, the optimization objective function related to defocus degree and sinusoidal fringe period is constructed by linear fitting. Finally, the sinusoidal error diffusion kernel of the optimized binary coded fringe is obtained. Simulation and experimental analysis show that the error diffusion nuclei with minimum phase error are different in different periods under different fuzzy degrees, which confirms the binary value of diffusion check image coding quality is related to image features. Experiment further proves that the phase error of the proposed algorithm can be reduced by 43.86%, 64.37% and 50.10%, respectively, compared with the universal Floyd-Steinberg diffusion method, under three defocus degrees. Compared with the improved Floyd-Steinberg diffusion method, the

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-05-11; 录用日期: 2021-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(61901287)、四川省重点研发专项(2021YFG0195, 2020YFG0112, 2020YFG0306)、四川省重大科技专项(2019ZDZX0039, 2018GZDZX0029)

通信作者: *zjp16@scu.edu.cn

phase error of the proposed algorithm can be reduced by 13.51%, 18.48% and 17.65%, respectively.

Key words image processing; error diffusion; binary encoding; genetic algorithm; structured light pattern

OCIS codes 100.2810; 120.5050; 150.1135

1 引言

物体三维信息的获取有着重要的现实意义,在获取过程中催生了多种三维测量技术^[1-2],其中相移轮廓术(Phase Shifting Profilometry, PSP)具有结构简单、非接触、成本低、精度高和测量速度快等优点,在工业质量在线检测和文物保护等多领域具有广泛的应用前景。投影条纹图经过三维物体的表面形貌调制后,使拍摄到的变形条纹图中的相位信息包含物体的深度信息,因此物体测量的精度与相位信息密切相关。以往使用正弦条纹图像进行投影测量,但测量结果易受商业投影仪非线性问题的影响,而且正弦条纹图需要 8 bit 才能进行灰度编码,大大限制了投影测量的速度。基于上述问题,学者利用二进制编码条纹图代替正弦图像进行投影测量^[3-8]。

正弦条纹图的二值编码方法可分为传统算法及其各类改进算法和各种优化迭代算法,因受高次谐波的影响,基于二进制图像的离焦投影测量技术的测量精度低于基于 8 bit 正弦条纹图,但测量速度大幅度提升。传统方法主要分为基于调制的算法和基于抖动的算法,基于调制的算法是在一维空间上来调制波形,使其离焦后尽可能接近正弦波,如 Ayubi 等^[9]提出的正弦脉冲调制算法和 Wang 等^[10]提出的最优脉冲调制算法,当条纹周期较大时,两种算法处理后的效果均不够理想。常见的基于抖动的算法有随机抖动^[11]、有序抖动^[12]和误差扩散^[13-14]等,有序抖动算法中的 Bayer 抖动算法^[12]简单,但重复性纹理严重。误差扩散算法是对图像二值编码过程中的剩余误差进行分摊传播,这很大程度上减小了图像二值化后存在的误差,为此得到了广泛应用,其中最经典的误差扩散法有 Floyd-Steinberg 扩散算法^[15]和 Stucki 扩散算法^[16],但两种算法在条纹周期较小的情况下效果欠佳。

优化迭代算法使用不同的目标函数对二值图像中的像素值进行优化,常见的算法有阈值优化^[17]、强度误差优化^[18]、频率域优化^[19]和相位误差优化^[20-21]等,主要采用的算法有遗传算法^[19-20,22-23]和搜索迭代优化算法^[18,21]。优化算法相比于传统算法更为耗时,而且全图优化的时间相比于图像块优化更长。直接对图像或图像块^[24]进行优化会因处

理的像素过多,使得优化过程十分漫长。最近, Zhou 等^[25]提出一种改进的 Floyd-Steinberg 算法(下文简称 H 算法),将优化过程转移到扩散核上可以形成相位误差更小的误差扩散核,然后使用优化的误差扩散核对正弦条纹进行二值编码。然而该算法仍采用普适优化策略,即力求使用同一扩散核编码的各周期条纹在不同的离焦程度下都取得较低的误差水平,未考虑扩散核编码不同条纹周期图像时误差改善水平存在差异,而对于特定的条纹周期,往往存在使编码图像的相位误差更小的扩散核。

现有的优化算法优化图像(块)与测量系统所使用的条纹图特征相关联。整图优化算法是对特定分辨率的条纹图像进行优化,图像保存占用的空间相对较大,此外分辨率变更后还需重新优化,这降低了优化结果的重复利用率。基于图像块的优化算法所需的优化时长随着条纹周期的增大而增加。误差扩散核的优化仍为普适性优化,未与条纹图特征和离焦程度等建立关系,未充分利用待编码条纹图像的特征信息。因此,本文对不同条纹频率和离焦程度的误差扩散核进行优化,将对图像中像素点的优化转为对误差扩散核系数的优化,同时考虑强度和相位误差以增强优化结果对离焦量变化的鲁棒性。相比于利用遗传算法对图像块的优化,本文算法的优化对象范围更小,优化时长受条纹周期变化的影响小,同时保留了优化结果与条纹特征对应的优势。此外,可将常用的条纹周期优化扩散核进行存储,能够进一步缩减某些测量场合中需要改变条纹频率所消耗的时间。相比于整图优化法,本文算法增强了图像分辨率变化过程中的灵活性。

2 基本原理

2.1 误差扩散二值编码的原理

误差扩散是对正弦条纹图像进行二值编码的一种常用方法,包括对像素灰度进行阈值化与将量化误差扩散到周围像素两个步骤,将连续图像离散为只有 0 和 1(或 255)两个值的图像,可以减少表达图像所需的位数。误差扩散的作用机制如图 1 所示,其中 k 为窗口大小, σ 为标准差。图 1(a)的正弦条纹图二值化后得到图 1(b),图 1(b)经过高斯模糊处理后,可以得到与图 1(a)十分相似的图 1(c),

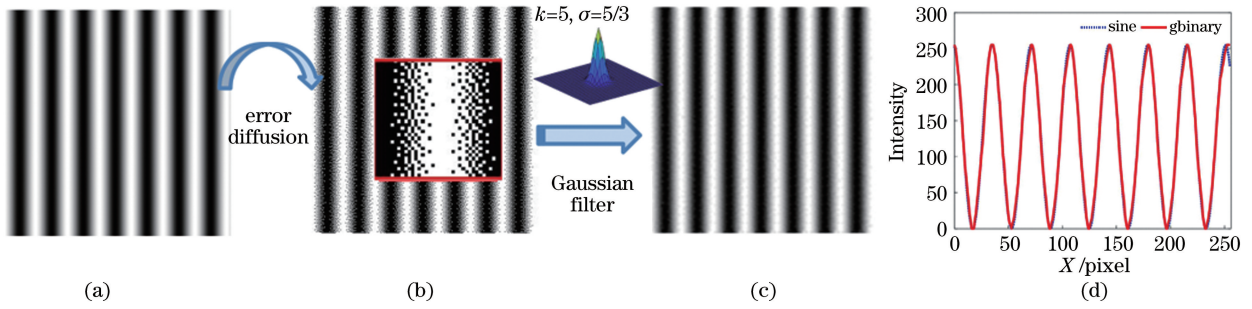


图 1 误差扩散的作用机制。(a)原图;(b)误差扩散后的图像;(c)高斯滤波后的图像;(d)图 1(a)和图 1(c)中第 128 行的灰度值
Fig. 1 Mechanism of error diffusion. (a) Original image; (b) image after error diffusion; (c) image after Gaussian filter; (d) gray values of line 128 in Fig. 1 (a) and Fig. 1 (c)

发现仅在图像边缘处有些许误差。

误差扩散过程的数学表示形式如下。

二值编码条纹图像的灰度值 I_b 可表示为

$$I_b(i, j) = \begin{cases} 1, & I_{\text{new}}(i, j) > 0.5 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: (i, j) 为对应的像素坐标; I_{new} 为误差扩散过程图的灰度值。灰度图像 I_{new} 可表示为

$$I_{\text{new}}(i, j) = I(i, j) + \sum_{i', j' \in s} h(x', y') e(i - x, j - y), \quad (2)$$

式中: I 为待编码的正弦条纹图像, 初始 I_{new} 等同于 I ; h 为误差扩散核, (x', y') 为扩散核所在的位置; s 为误差扩散范围, 其与扩散核大小有关; e 为阈值量化误差, 可表示为

$$e(i, j) = I_{\text{new}}(i, j) - I_b(i, j). \quad (3)$$

经典的 Floyd-Steinberg 误差扩散核可表示为

$$h_F(x, y) = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} & * & 7 \\ - & 3 & 5 & 1 \\ & & & \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: * 表示正在处理像素; _ 表示已处理像素。

2.2 遗传算法优化误差扩散核

利用遗传算法来更新误差扩散核系数, 使优化后的扩散核与条纹周期和投影离焦程度建立联系, 从而提升扩散核与图像特征间的适配性, 进而提高相位提取的精度。通过优化误差扩散核来间接优化二值正弦条纹图, 将优化范围缩小到扩散核大小, 较直接对图像进行优化的算法节省了优化时间, 尤其是优化时间不随正弦条纹周期或随图像分辨率的增加而大幅度增加。

2.2.1 多参数优化目标

假定 $\alpha_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示分配到邻域像素的误差权重系数, 则优化的误差扩散核表示为

$$h_{\text{optimized}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \alpha_i} \begin{bmatrix} & * & \alpha_1 \\ - & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ & & & \end{bmatrix}. \quad (5)$$

采用四步相移法从 $c \times w$ 大小的理想正弦图像 I 和被高斯滤波器 g 平滑后的二值编码图像 I_b 中提取截断相位, 并将其展开为连续相位 ϕ_s 和 ϕ_b , 相位误差 E_p 和强度误差 E_i 可表示为

$$E_p = \sqrt{\frac{1}{c \times w} \sum_{x=1}^c \sum_{y=1}^w [\phi_s(x, y) - \phi_b(x, y)]^2}, \quad (6)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{1}{c \times w} \sum_{x=1}^c \sum_{y=1}^w [I(x, y) - g \otimes I_b(x, y)]^2}, \quad (7)$$

式中: \otimes 为卷积符号。 N 步相移图像的灰度值可表示为

$$I_n = A + B \cos(\varphi - 2\pi n/N), n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (8)$$

式中: A 为图像的平均灰度; B 为图像的调制度; φ 为截断相位, 可表示为

$$\varphi = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos(2\pi n/N)} \right]. \quad (9)$$

构建多参数约束的优化目标函数, 使用遗传算法来优化误差扩散核 $h_{\text{optimized}}$ 。根据不同的条纹周期和离焦程度, 为强度和相位误差分配不同的权重, 构造与条纹周期和设备离焦程度相关的目标函数。利用不同大小的高斯模糊核来模拟不同光场投影系统的离焦程度, 窗口大小 k 分别为 5 pixel \times 5 pixel, 7 pixel \times 7 pixel, \dots , 13 pixel \times 13 pixel, 标准差 σ 设置为窗口大小的 1/3(下同)。采用 Floyd-Steinberg 误差扩散核来编码条纹周期为 $T (T=20, 40, \dots, 120 \text{ pixel})$ 的正弦条纹图像以获取二值图, 通过计算机来模拟二值图像的离焦过程, 依据

$$\begin{cases} E_{\text{total}} = y \frac{E_p}{2\pi} + (1-y) \frac{E_i}{2I_m} \\ y = f(T, k) \end{cases} \quad (10)$$

来计算各周期下二值条纹图的归一化相位均方根 (Root Mean Square, RMS) 误差与强度均方根误差相等时的权重 y , 线性拟合得到权重 y 是关于图像条纹周期 T 和高斯窗大小 k 的函数, 即 $y = -0.002072T + 0.022782k + 0.720739$ 。式中: E_{total} 表示图像的平衡误差; I_m 表示图像的最大灰度值。

2.2.2 优化流程

若条纹图像的分辨率越大, 则优化所需的时长越长, 若图像的分辨率过小, 则无法充分考虑条纹图像的特征。综合考虑算法的性能与耗时, 设置图像的分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 在 128 pixel 周期以内的正弦条纹上至少有两个完整周期可以评估扩散核。扩散核的优化步骤如下。

1) 种群初始化。每代种群数量选取 64, 随机生成初代种群以得到丰富的物种信息, 初始化的过程中保留一个 Floyd-Steinberg 扩散核, 防止随机物种出现整体质量偏差的情况。每个物种由 4 个基因组成, 对应扩散核中的 α_i ($i=1, 2, 3, 4$), 物种中每个基因码字长为 6。

2) 平衡误差计算和物种选择。将每个物种转换为对应的误差扩散核, 采用“S”型扩散路径对正弦图像进行二值编码^[14], 消除误差在某一方向的累积。依据(8)式来计算物种的平衡误差, 将平衡误差按照逆序的顺序为物种赋予不同权重, 依据轮盘赌策略来选择杂交目标。

3) 杂交。随机选择杂交点, 依据杂交概率来杂交两物种对应的基因, 保留每代中最优放入个体信息。为了使产生的种群更丰富, 杂交概率为 100%。

4) 突变。突变为现有种群引入新的基因, 在基本保持收敛的情况下丰富可能性。完成杂交的物种依据 0.3% 的突变概率来随机选择突变点, 对突变点进行基因突变以生成下一代误差扩散系数。

5) 迭代。更新当前的最小平衡误差与对应的物种信息, 达到最大迭代次数后跳至步骤 6), 否则回到步骤 2) 对物种迭代。考虑优化耗时, 依据收敛实验来设置迭代次数 G_{max} , 默认 G_{max} 为 40 次。

6) 图像生成。将最小平衡误差所对应的物种转换为误差扩散核, 根据 2.1 节所述的误差扩散原理可对任意尺寸的正弦图像生成二值编码条纹图像。

3 仿真模拟

将所提算法与经典的 Floyd-Steinberg 误差扩散核(下文简称 F 算法)和 Zhou 等^[25]提出的优化扩散核(下文简称 H 算法)进行仿真对比, 用来验证所提算法的表现。

3.1 扩散核与周期相关性

当 k 分别为 5, 9, 13 pixel 时, 不同条纹周期 (T 分别为 24, 36, ..., 108, 120 pixel) 优化后得到的误差扩散核各有 9 个, 在不同尺寸的窗口下采用优化得到的扩散核来编码各条纹周期以分别计算相位误差, 探索不同误差扩散核与条纹周期对二值化正弦条纹图质量的影响, 不同条纹周期下二值编码的相位误差分布如图 2 所示。图 2 中 Kernel-1 表示 $T = 24 \text{ pixel}$ 下的优化扩散核, Kernel-9 表示 $T = 120 \text{ pixel}$ 下的优化扩散核, 其余一一对应。每张图都减去各自的误差最小值以更直观地展现结果差异, 可以观察到对角线方向的高度低(颜色深)于其他区域, 即随着离焦程度的增大, 图像质量的提升有所减弱。

不同尺寸的窗口下, 当扩散核编码不同周期的条纹图时, 总是在其优化周期上取得最小的相位误差。当 k 分别为 5, 9, 13 pixel 和 $T = 36 \text{ pixel}$ 时, 运用其他周期 ($T = 24, 48, \dots, 108, 120 \text{ pixel}$) 优化的扩散核所得到的相位误差如图 3 所示。图 3 中从上

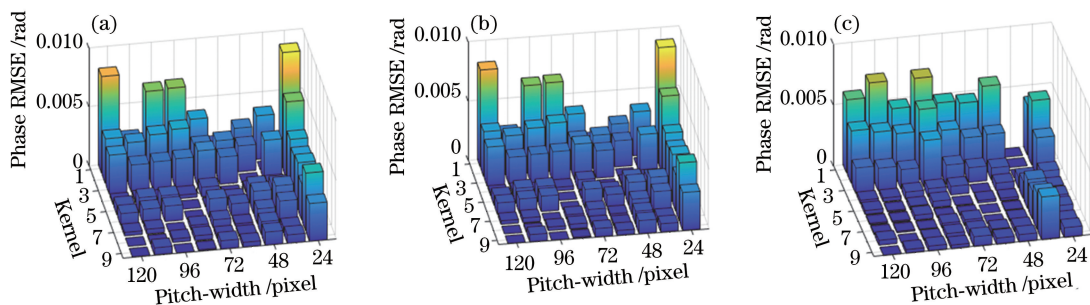


图 2 不同高斯窗大小下不同条纹周期二值编码的相位误差分布。(a) $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$; (b) $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$; (c) $13 \text{ pixel} \times 13 \text{ pixel}$

Fig. 2 Phase error distributions of periodic binary codes with different fringe sizes under different Gaussian windows. (a) $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$; (b) $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$; (c) $13 \text{ pixel} \times 13 \text{ pixel}$

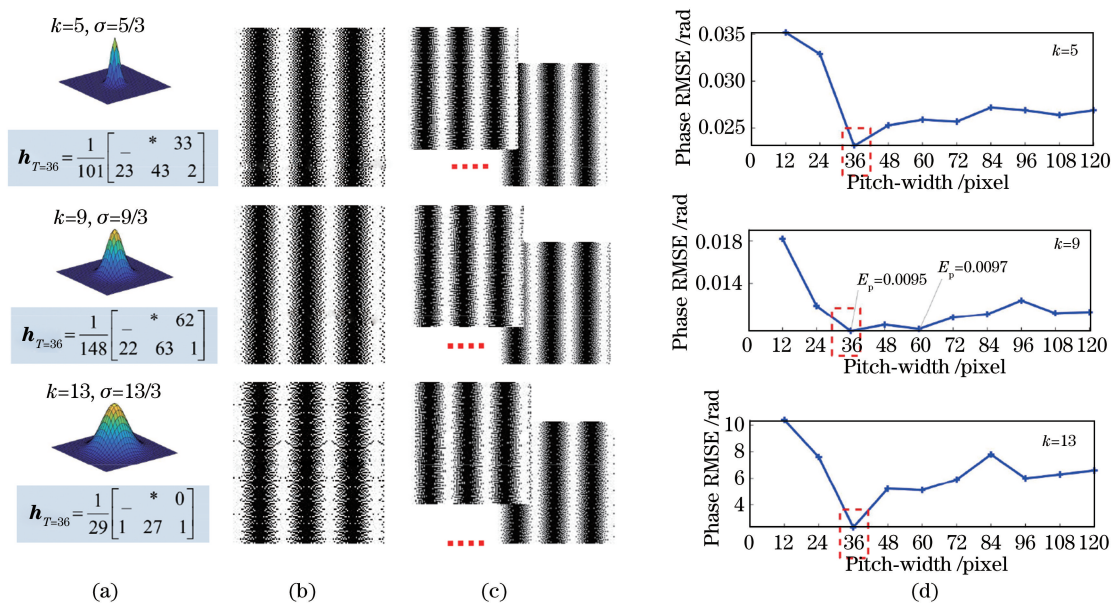


图 3 扩散核编码不同条纹图的误差对比。(a)不同尺寸窗口下优化所得的扩散核;(b) 36 pixel 周期下的编码图像;
(c) 12~120 pixel 周期下的编码图像;(d)不同周期性下的相位误差

Fig. 3 Error comparison of different fringe patterns in diffused kernel coding. (a) Diffusion nuclei optimized under different size windows; (b) encoded images at 36 pixel periods; (c) encoded images with 12-120 pixel cycles; (d) phase errors under different periodicity

到下每行图像的模糊程度逐渐增加,虚线框标注了相位误差最小的位置与对应的优化周期,在不同尺寸的窗口下,相位误差最小处所对应的优化周期都为 36 pixel,与被编码条纹图像中的条纹周期相同。

3.2 收敛性检验

在 $T=36$ pixel 和 k 分别为 5, 9, 13 pixel, 以及 $k=5$ pixel 和 T 分别为 36, 72, 108 pixel 的情况下分别对扩散核进行优化,收敛过程如图 4 所示。从图 4 可以看到,图 4(a)中的条纹周期不变,随着窗口尺寸的增加,图像的平衡误差逐渐减小,图 4(b)

中的模糊程度固定,图像的平衡误差因条纹周期变化而产生细微差别,但总体上,在迭代到 30 次左右已接近收敛,后续优化过程中种群的平均平衡误差已接近平缓。

当 $T=36$ pixel 和 $k=5$ pixel 时,多次重复优化并观察优化结果是否稳定,考察随机因素对迭代 40 次后结果的影响。使用三步、四步和六步相移分别重复优化 5 次,表 1 给出了优化扩散核及对应误差,其中 Kernel 和 E_{total} 后的数字表示相移步数。重复迭代 40 次后,由扩散核计算出的平衡误差相对稳定,

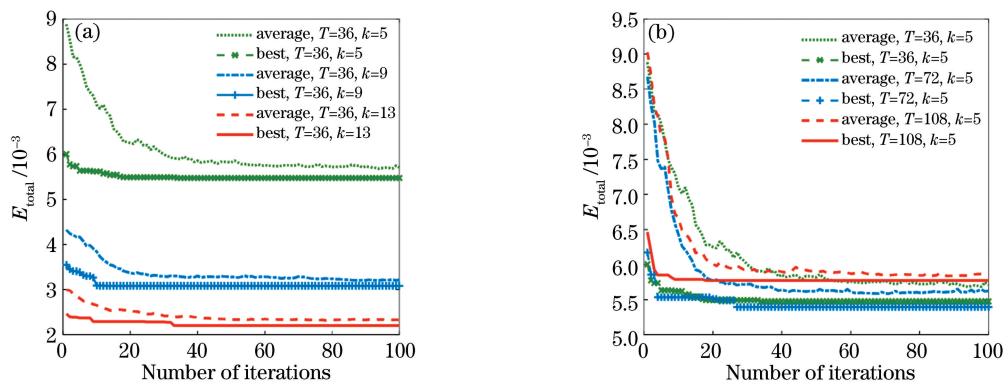


图 4 不同情况下误差扩散核的优化收敛结果。(a) $T=36$ pixel, k 分别为 5, 9, 13 pixel; (b) $k=5$ pixel, T 分别为 36, 72, 108 pixel

Fig. 4 Optimal convergence results of error diffusion kernel under different conditions. (a) $T=36$ pixel, $k=5, 9, 13$ pixel, respectively; (b) $k=5$ pixel, $T=36, 72, 108$ pixel, respectively

表 1 相移步数对优化误差的影响

Table 1 Influence of number of phase shift steps on optimization error

Parameter	1	2	3	4	5
Kernel-3	$\frac{1}{95} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 55 \\ 36 & 4 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{101} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 43 \\ 12 & 43 & 3 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{101} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 33 \\ 23 & 43 & 2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{63} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 26 \\ 7 & 29 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{130} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 53 \\ 16 & 60 & 1 \end{bmatrix}$
$E_{total-3}$	0.0051	0.0054	0.0053	0.0053	0.0053
Kernel-4	$\frac{1}{135} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 45 \\ 28 & 61 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{172} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 63 \\ 50 & 54 & 5 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{149} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 53 \\ 35 & 61 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{93} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 32 \\ 24 & 36 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{176} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 63 \\ 54 & 58 & 1 \end{bmatrix}$
$E_{total-4}$	0.0050	0.0051	0.0050	0.0048	0.0049
Kernel-6	$\frac{1}{56} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 27 \\ 18 & 10 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{145} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 44 \\ 40 & 60 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{109} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 33 \\ 22 & 53 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{130} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 40 \\ 28 & 62 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{117} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 54 \\ 15 & 47 & 1 \end{bmatrix}$
$E_{total-6}$	0.0049	0.0047	0.0046	0.0045	0.0049

说明相移步数对误差结果的影响较小。因此,为了减少优化时间,优化过程中选取的迭代次数默认为 40 次,默认采用三步相移。

3.3 算法对比

在 k 分别为 5,9,13 pixel 的情况下模拟不同条纹图像的离焦程度,对三种算法进行仿真对比,结果如图 5 所示。当 $T=36$ pixel 和 $k=5$ pixel 时,本文算法所得的二值条纹图如图 5(d) 所示,其中图 5(a)为理想的正弦条纹图,图 5(b)和图 5(c)分别为使用 H 算法和 F 算法所得的二值条纹图。

图 6 给出了三种算法在不同大小的高斯窗下计算的相位误差。从图 6 可以看到,H 算法的相位误差相比于 F 算法有很大提升,所提算法的相位误差相比于 H 算法又有一定的提升。当在较小的离焦程度,如 $k=5$ pixel 时,所提算法的相位误差明显低于其余两种算法,特别是当 $T=120$ pixel 时,F 算法与 H 算法的计算结果十分相近。当在中度离焦,如 $k=9$ pixel 和 $T>72$ pixel 时,所提算法的相位误差

在 0.0080~0.0085 rad 之间,H 算法的相位误差则

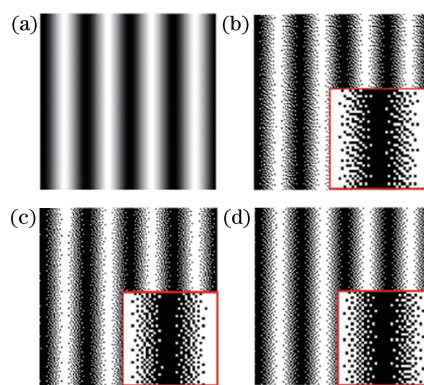


图 5 不同算法生成的条纹模式图及其局部放大图。(a)在 $T=36$ pixel 下的理想正弦条纹图;(b) H 算法;(c) F 算法;(d)所提算法

Fig. 5 Fringe pattern graphs generated by different algorithms and their local enlargements. (a) Ideal sinusoidal fringe pattern at $T = 36$ pixel; (b) H algorithm; (c) F algorithm; (d) proposed algorithm

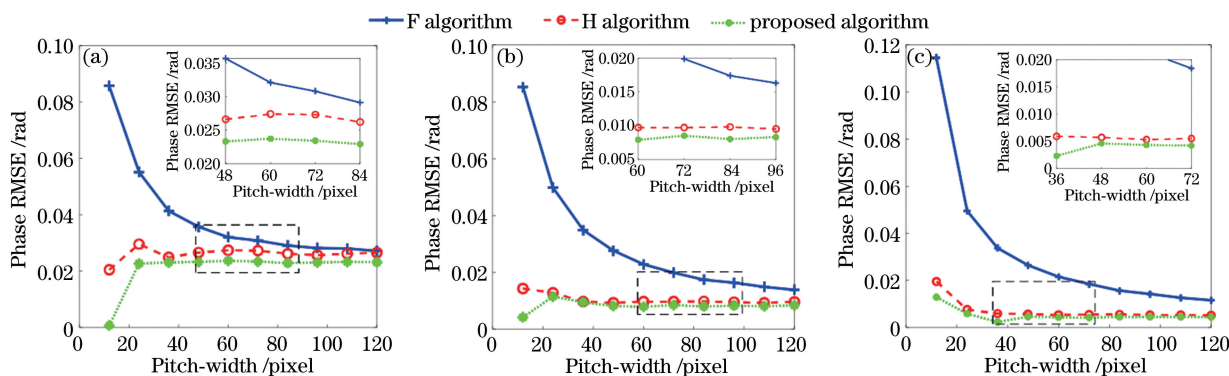


图 6 不同算法在不同大小的高斯窗下的相位误差及其局部放大图。(a) 5 pixel×5 pixel;(b) 9 pixel×9 pixel;(c) 13 pixel×13 pixel

Fig. 6 Phase errors and local magnification of different algorithms in Gaussian windows of different sizes. (a) 5 pixel×5 pixel; (b) 9 pixel×9 pixel; (c) 13 pixel×13 pixel

在 $0.0093 \sim 0.0098$ rad 之间;随着离焦程度的进一步增加,当 $k=13$ pixel 和 $T \geq 84$ pixel 时,所提算法的相位误差约为 0.0045 rad, H 算法的相位误差则逐渐由 0.0056 rad 降至 0.0052 rad。

4 实验研究

为了验证所提算法在实际拍摄测量系统中的性能,布置图 7 的实验系统进行测试。该系统包括 CB-965 型爱普生投影仪(分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$)和 MER2-160-227U3M 型数字相机(分辨率为 $1440 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$),另有一台计算机用于图像捕获、处理与结果计算。投影目标平面与投影仪相距约为 50 cm ,投影仪的光轴基本垂直于目标平面,相机与投影仪光轴的夹角约为 10° 。

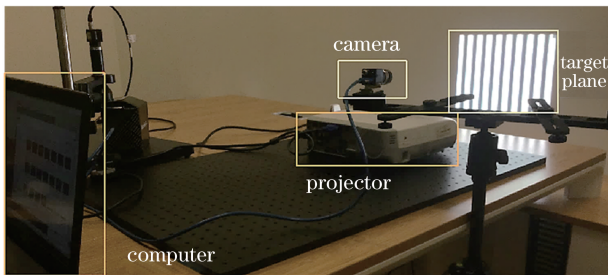


图 7 实验系统的布置

Fig. 7 Layout of experimental system

使用仿真环节所得的误差扩散核、F 算法误差扩散核和 H 算法误差扩散核分别对 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 大小的正弦条纹图进行编码,可以得到投影所需的二值条纹图,采取四步相移法来求解二值图像的相位信息,将 12 步相移正弦条纹图的投影计算结果作为真实值以对比三种算法的相位精度。

图 8(a)给出了 $T=72$ pixel 的方波条纹图,其灰度值的变化曲线如图 8(c)实线所示,不同离焦程度下方波条纹边界的对比度降低幅度不同。依据 Hu 等^[26]提出的方法,以一维高斯函数作为投影过程中的图像模糊函数,通过分析方波条纹图中条纹边界投影前后的灰度值差值变化,可以粗略估计当前系统的离焦程度,以此为投影系统的离焦程度提供具体的量化依据,也为扩散核优化过程中参数的选取提供参考。图 8(b)为捕获的离焦后方波条纹图,为了减少估计误差,利用图像中央长 100 pixel 的条纹边界来估计投影设备的离焦程度。实验中,首先将系统中测量平面的离焦量调节至接近于优化过程中的离焦程度,即当 k 分别为 $5, 9, 13$ pixel 时对应的离焦程度,再向目标平面连续投影由三种编码算法所得的二值条纹图和相同周期的标准正弦条纹图,最后由相机同步采集至计算机进行图像处理。

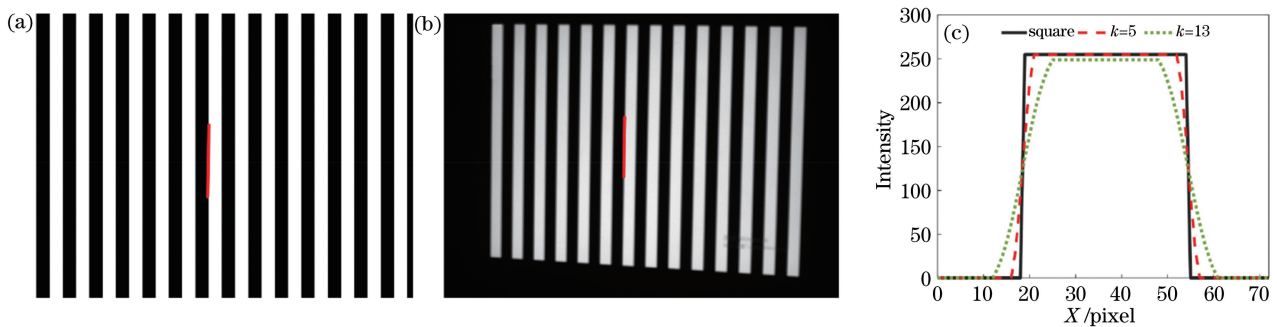


图 8 离焦对方波条纹的影响。(a)离焦前 72 pixel 周期下的方波条纹图;(b)离焦后捕获的方波条纹图;
(c)离焦程度对方波条纹边界灰度值的影响

Fig. 8 Effect of defocusing square wave stripes. (a) Square wave fringe image at 72 pixel period before defocusing; (b) square wave fringe image captured after defocusing; (c) effect of defocus degree on gray value of square wave fringe boundary

选取相机捕获图像中央 $300 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ 大小的图像块用于相位解析,计算各算法解析后的相位与标准正弦条纹相位之差的均方根误差并将其作为评价指标,用来评估各二值编码算法的优劣。图 9 给出了当 $T=36$ pixel 时,三种算法生成的离焦二值条纹图像及其截断相位图、连续相位图和与标准正弦条纹的相位误差图。从图 9 可以看到,相

比于其他两种算法,所提算法的误差范围更为集中。其他周期的相位误差结果如图 10 所示。

图 10 的结果与仿真结果相近,说明所提算法的编码效果较广泛采用的 F 算法有显著提升,同时优于新公开的基于优化的 H 算法。表 2 给出了所提算法的编码二值图相位误差相较于 F 算法和 H 算法的提升效果。在相对聚焦($\sigma \approx 5/3$)的情况下,当

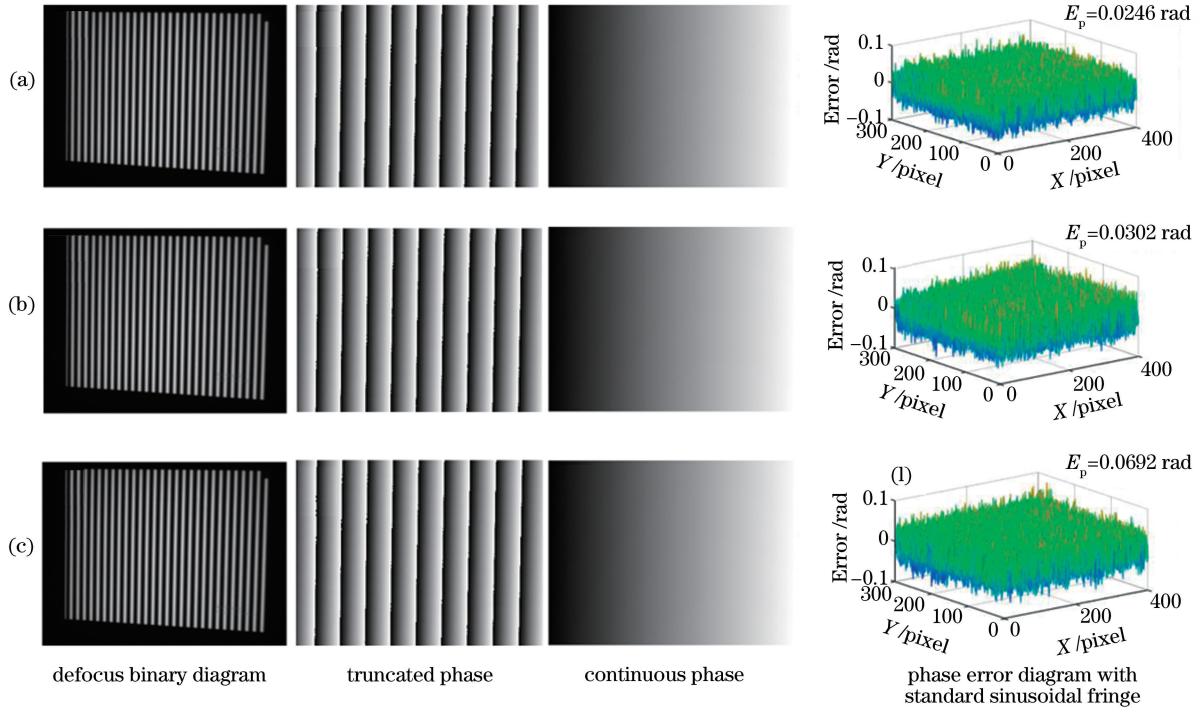


图 9 不同算法得到的结果。(a)所提算法;(b) F 算法;(c) H 算法

Fig. 9 Results of different algorithms. (a) Proposed algorithm; (b) F algorithm; (c) H algorithm

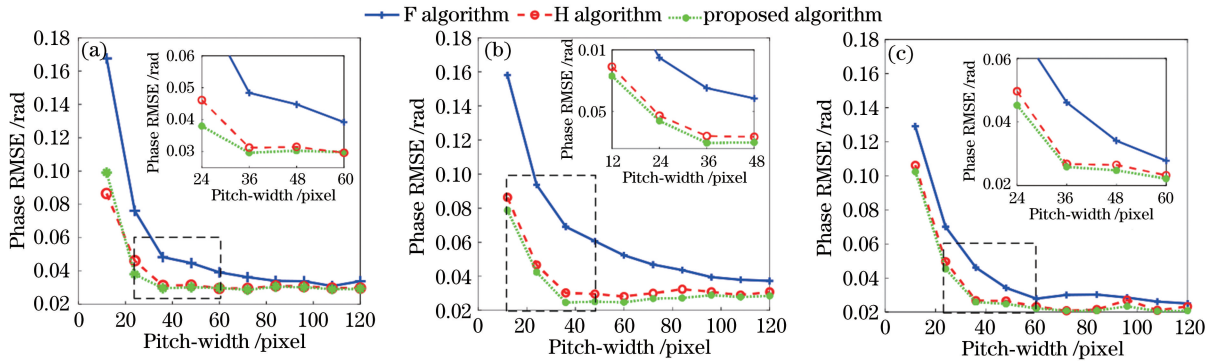


图 10 不同离焦程度下的相位误差及其局部放大图。(a)小离焦, $\sigma \approx 5/3$; (b)中等离焦, $\sigma \approx 9/3$; (c)较大离焦, $\sigma \approx 13/3$

Fig. 10 Phase errors and local magnification at different defocusing degrees. (a) Small defocus, $\sigma \approx 5/3$;

(b) medium defocus, $\sigma \approx 9/3$; (c) large defocus, $\sigma \approx 13/3$

$T=24$ pixel 时,所提算法表现出较大优势,相位误差为 0.0380 rad,而 H 算法的相位误差为 0.0461 rad,F 算法的相位误差 0.0762 rad,分别提升了 17.65% 和 50.10%;所提算法的编码精度相较于 F 算法提升 6.04%~40.82%之间,较 H 算法提升 1.38%~5.12%,除了 $T=60$ pixel 下的结果相近,仅有 $T=12$ pixel 下的误差大于 H 算法。在中等离焦($\sigma \approx 9/3$)的情况下,当 $T=36$ pixel 时,所提算法的相位误差为 0.0246 rad,而 H 算法的相位误差为 0.0302 rad,F 算法的相位误差 0.0692 rad,分别提升了 18.48% 和 64.37%。其他周期上,所提算法的优势明显,编码精度相较于 F 算法提升 23.47%~58.60%,相对

于 H 算法提升 4.15%~15.88%。在较大离焦($\sigma \approx 13/3$)的情况下,所提算法的编码精度,较 F 算法提升 16.77%~43.86%,较 H 算法除了 $T=72$ pixel 情况下的相位误差水平相近,其余周期提升 2.46%~13.51%。

根据上述仿真和实验结果,本文提出的正弦条纹二值编码算法可以在投影装置相对聚焦、中等离焦以及较大离焦情况下的绝大多数周期,相较于广泛采用的传统 F 误差扩散算法,以及近期公开基于优化的 H 编码算法,均可以生成高质量的正弦结构光场。

表 2 不同算法的编码二值图相位误差
Table 2 Phase errors of coded binary graphs with different algorithms

Pitch-width / pixel	Small defocus ($\sigma \approx 5/3$)		Medium defocus ($\sigma \approx 9/3$)		Large defocus ($\sigma \approx 13/3$)	
	F / %	H / %	F / %	H / %	F / %	H / %
12	40.82	-14.61	50.16	8.75	20.62	3.53
24	50.10	17.65	54.66	9.01	35.38	8.81
36	38.78	5.12	64.37	18.48	43.86	3.34
48	32.32	3.78	58.60	15.18	27.41	6.46
60	23.92	-0.69	52.79	12.13	20.26	4.48
72	20.80	2.72	42.53	10.37	31.07	0.13
84	10.12	1.45	37.51	15.88	31.11	2.95
96	10.68	1.44	26.76	6.41	18.02	13.51
108	6.04	2.54	26.76	4.15	21.39	2.46
120	13.08	1.38	23.47	7.56	16.77	10.41

5 分析与讨论

实验中相位误差曲线的总体变化趋势与仿真结果基本一致,窄条纹情况下受系统因素的影响较大,条纹对比度和噪声等因素对相位误差的计算结果会造成的一定影响。需特别说明的是, $T=12$ pixel 单周期下可编码的像素较其他周期偏少,相位提取更易受条纹噪声和调制度等因素的影响,实验结果未能表现出仿真环节中较 H 算法的效果。对实验捕获图像的调制度均值进行计算,归一化结果如图 11 所示。从图 11 可以看到,在三个离焦程度下, $T=12$ pixel 的调制度都明显低于其他周期。

此外,实验过程中估计投影仪的离焦程度与仿真环节所使用的离焦程度略有偏差,而相比于其他周期, $T=12$ pixel 的情况下更易受到离焦程度的影响。不同尺寸的窗口下相位误差随图像模糊程度的变化趋势如图 12 所示。从图 12 可以看到,在大部

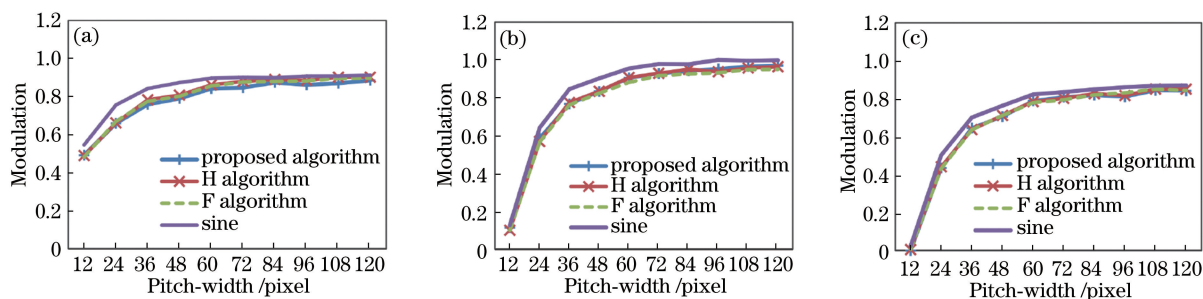


图 11 不同离焦程度下不同周期条纹图像的平均调制度。(a)小离焦, $\sigma \approx 5/3$;(b)中离焦, $\sigma \approx 9/3$;(c)较大离焦, $\sigma \approx 13/3$
Fig. 11 Average modulation of fringe images with different periods under different defocusing degrees.

(a) Small defocus, $\sigma \approx 5/3$; (b) medium defocus, $\sigma \approx 9/3$; (c) large defocus, $\sigma \approx 13/3$

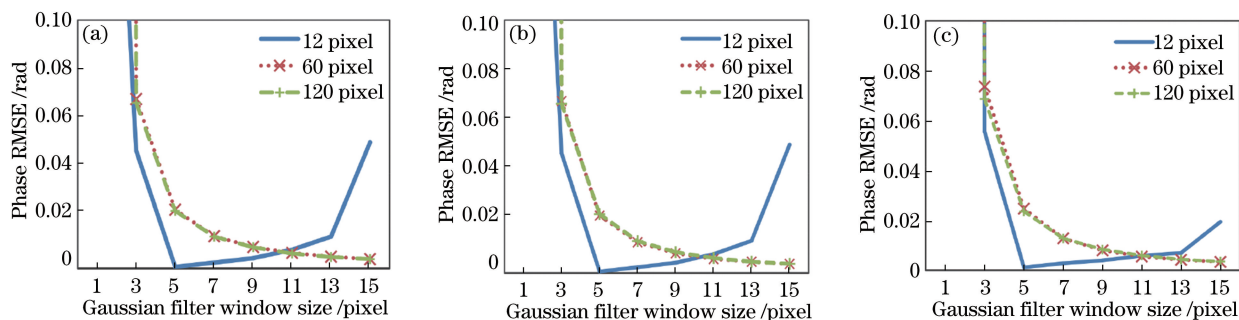


图 12 不同模糊程度下相位误差随图像模糊程度变化趋势。(a) $k=5$ pixel;(b) $k=9$ pixel;(c) $k=13$ pixel

Fig. 12 Phase error changes with the image blur degree under different blur degree. (a) $k=5$ pixel; (b) $k=9$ pixel; (c) $k=13$ pixel

分离焦程度下,相比于另两个周期, $T=12$ pixel 的情况下的相位误差随离焦程度变化的曲线具有更大斜率,意味着当离焦量估计不准确时,12 pixel 周期下条纹图像的相位误差变化更大,造成实验中 $T=$

12 pixel 的情况下所得的相位误差高于仿真误差。后续可考虑在优化过程中加入更多的因素参与优化,如图像调制度和噪声水平等以提高扩散核在实际三维测量中的鲁棒性。

在同一台计算机的相同设置上对比了几种优化算法的耗时,结果如表 3 所示。其中包含文献[20]利用遗传算法对二值块进行优化的算法,文献[24]对二值条遍历搜索优化的算法,文献[25]对误差扩散核的优化算法,各算法均未使用 GPU 加速。文献[20]和文献[24]采用论文中的设置生成二值块,所提算法及文献[25]优化图像的尺寸设为 256 pixel \times 256 pixel,其余参数均参照论文,优化时长过长的数据由该算法平均迭代时间乘以迭代次数得到。优化周期的改变对所提算法优化时长的影响较小,但由于未对算法进行优化,小周期上的优化时长大于基于二值块优化的算法。

表 3 几种算法的优化耗时对比

Table 3 Comparison of optimization time of several algorithms
unit: min

Pitch-width / pixel	Proposed algorithm	Ref. [20]	Ref. [24]	Ref. [25]
36	68.22	100.69	0.02	23064.00
72	71.77	232.74	25.43	23736.00
120	72.97	380.43	18420.00	26526.00

6 结 论

本文利用遗传算法来优化误差扩散核,改进优化目标使其与条纹周期和离焦程度相关联,得到使编码条纹图像的相位误差更小的误差扩散核,通过优化误差扩散核可以间接得到更佳的二值条纹图。与利用遗传算法优化二值块的方法相比,所提算法的优化范围更小,所需的优化时长不随条纹周期的增大而增大;相比于其他误差扩散法,所提算法更能充分利用条纹图的周期信息,编码二值图的相位误差更小。通过仿真和实验对比 F 算法和 H 算法,结果显示所提算法在各条纹周期和离焦程度下都可有效减少相位误差。进一步进行实验验证,所提算法的相位误差较 F 算法最大可减小 64.37%,最小可减小 6.04%,较近年来提出的基于优化的 H 算法最大亦可减小 18.48%。本文在遗传算法的设计上仍有改进空间,如优化图像大小和采用 GPU 加速等,有利于进一步缩短扩散核的优化时长。

参 考 文 献

- [1] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 18-31.
- [2] Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001.
- [3] 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.
- [4] Zhu J P, Su X Y, You Z S, et al. Temporal-spatial encoding binary fringes toward three-dimensional shape measurement without projector nonlinearity [J]. Optical Engineering, 2015, 54(5): 054108.
- [5] Zhu J P, Zhou P, Su X Y, et al. Accurate and fast 3D surface measurement with temporal-spatial binary encoding structured illumination[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28549-28560.
- [6] Zhou P, Zhu J P, Su X Y, et al. Experimental study of temporal-spatial binary pattern projection for 3D shape acquisition[J]. Applied Optics, 2017, 56(11): 2995-3003.
- [7] Liang Z Y, Cheng Z D, Liu Y Y, et al. Fast Fourier single-pixel imaging based on Sierra-Lite dithering algorithm[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(6): 064202.
- [8] Hu H H, Gao J, Zhou H Y, et al. A combined binary defocusing technique with multi-frequency phase error compensation in 3D shape measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105806.
- [9] Ayubi G A, Ayubi J A, di Martino J M, et al. Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection[J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3682-3684.
- [10] Wang Y, Zhang S. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing[J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4121-4123.
- [11] Purgathofer W, Tobler R F, Geiler M. Forced random dithering: improved threshold matrices for ordered dithering [C]//Proceedings of 1st International Conference on Image Processing, November 13-16, 1994, Austin, TX, USA. New York: IEEE Press, 1994: 1032-1035.
- [12] Bayer B E. An optimum method for two-level rendition of continuous-tone pictures [EB/OL]. [2021-04-14]. [https://sci-hub.ren/10.1016/0141-9382\(91\)90005-x](https://sci-hub.ren/10.1016/0141-9382(91)90005-x).
- [13] Wang Y J, Zhang S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns [J].

- Applied Optics, 2012, 51(27): 6631-6636.
- [14] 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.
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.
- [15] Floyd R W, Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial gray scale [EB/OL]. [2021-04-14]. https://www.researchgate.net/publication/238727698_An_adaptive_algorithm_for_spatial_gray_scale.
- [16] Stucki P. Mecca-a multiple-error correcting computation algorithm for bilevel image hardcopy reproduction [R]. Switzerland: Technical Report, IBM Res Lab, 1981.
- [17] Meng S S, Cai N, Lin B. Threshold-optimized dithering technique for high-quality 3D shape measurement [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(8): 0812002.
孟森森, 蔡宁, 林斌. 基于阈值优化抖动算法的高质量三维形貌测量 [J]. 光子学报, 2019, 48(8): 0812002.
- [18] Dai J F, Li B W, Zhang S. Intensity-optimized dithering technique for three-dimensional shape measurement with projector defocusing [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 53: 79-85.
- [19] Cai N, Chen Z B, Cao X Q, et al. Optimized dithering technique in frequency domain for high-quality three-dimensional depth data acquisition [J]. Chinese Physics B, 2019, 28(8): 084202.
- [20] Cai N, Chen Z B, Lin B, et al. Genetic method to optimize dithering technique in phase domain for high-quality binary fringe generation [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(8): 0811002.
蔡宁, 陈浙泊, 林斌, 等. 基于遗传算法相位抖动优化的高质量二值条纹产生方法 [J]. 光子学报, 2019, 48(8): 0811002.
- [21] Li B W, Wang Y J, Dai J F, et al. Some recent advances on superfast 3D shape measurement with digital binary defocusing techniques [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 54: 236-246.
- [22] Cai N, Chen Z B, Cao X Q, et al. Multi-objective strategy to optimize dithering technique for high-quality three-dimensional shape measurement [J]. Chinese Physics B, 2019, 28(10): 104210.
- [23] Cai N, Chen Z B, Lin B, et al. High-quality three-dimensional shape measurement based on binary particle swarm dithering optimization [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004003.
蔡宁, 陈浙泊, 林斌, 等. 基于离散粒子群抖动优化的高质量三维形貌测量 [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1004003.
- [24] Silva A, Muñoz A, Flores J L, et al. Exhaustive dithering algorithm for 3D shape reconstruction by fringe projection profilometry [J]. Applied Optics, 2020, 59(13): D31-D38.
- [25] Zhou P, Cai N, Wang T, et al. High-quality 3D shape measurement by kernel-optimized high sinusoidal similarity dither patterns [J]. Applied Optics, 2020, 59(34): 10645-10650.
- [26] Hu Y, Liu Z, Yang D Z, et al. Online fringe pitch selection for defocusing a binary square pattern projection phase-shifting method [J]. Optics Express, 2020, 28(21): 30710-30725.