

# 基于数字微镜器件随机编码调制的相位成像

谢熙伟, 胡静, 沈亦兵\*

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 数字微镜器件(DMD)作为空间光调制器,有着高调制速度、高精度的优势,可对照明光进行振幅调制或相位调制,广泛应用于相位成像系统中。利用 DMD 对照明光振幅进行随机编码调制,通过数值仿真分析 DMD 加载随机编码图案时最小调制单元尺寸、开/关占比对相位成像的影响,利用差值映射迭代算法实现光场重建。通过实验验证了基于数值仿真分析所得的参数可以更快的迭代速度、更少的测量次数完成振幅与相位的恢复,本文方法对于视场为  $4.3\text{ mm}\times 4.3\text{ mm}$  的物体的重建分辨率可达  $6.9\text{ }\mu\text{m}$ 。

**关键词** 成像系统; 相位成像; 随机编码; 差值映射算法; 数字微镜器件

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2311001

## Phase Imaging Based on Random Coding Modulation of Digital Micro-Mirror Device

Xie Xiwei, Hu Jing, Shen Yibing\*

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** Digital micro-mirror devices (DMDs) as spatial light modulators, have the advantages of high modulation speed and accuracy and can perform amplitude or phase modulation for illumination light, which are widely used in phase imaging systems. In this paper, a DMD is used for the random coding modulation of illumination light amplitude. We simulate the influences of the smallest modulation unit and switch ratio on phase imaging when random coding patterns are loaded on the DMD. Then we use a difference mapping iterative algorithm for light field reconstruction. Furthermore, it is experimentally verified that based on the parameters obtained via numerical simulation, we can retrieve amplitude and phase with a higher iteration speed and a fewer measurement times. In addition, for an object with the field of view of  $4.3\text{ mm}\times 4.3\text{ mm}$ , the reconstruction resolution reaches  $6.9\text{ }\mu\text{m}$ .

**Key words** imaging systems; phase imaging; random coding; difference mapping algorithm; digital micro-mirror device

**OCIS codes** 110.1758; 100.5070; 100.3010

## 1 引 言

现有的光学传感器无法直接记录光场的相位信息,但光波的强度和相位信息并非完全独立,传感器所记录的强度信息也携带了相位信息。结合先验知识和探测到的强度信息可求解物体的相位信息,该方法在自适应光学、衍射光学、天文成像、波前检测等众多领域都有着广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。

求解光场复振幅分布的技术方法可分为两大类:干涉法与非干涉法。局限于光源的相干性、参考光束、环境稳定性等因素,干涉法的计算成本高

且对测量时的外界环境或者器材的机械稳定性要求严格,而非干涉法极大地降低了求解物体相位的难度。1971年, Gerchberg 和 Saxton<sup>[5]</sup>首次提出了基于光的衍射传输特性在频域和空间域之间通过迭代运算求解相位的 Gerchberg-Saxton(GS)算法<sup>[5]</sup>。在此基础上, Fienup<sup>[6]</sup>引入有效约束域以及反馈机制对 GS 算法进行改进,提出了误差下降(ER)和混合输入输出(HIO)算法,杨-顾算法的提出进一步扩大了相位恢复的应用范围,但其迭代方法容易出现陷入局部极小值、伪像等问题<sup>[7]</sup>。基于强度传输方程(TIE)的确定性相位恢复算法,

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-07-12; 录用日期: 2020-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(61327902, 61927802)

\* E-mail: srr8966@163.com

通过求解二阶微分方程重构相位,但该求解过程复杂且更适用于近场区域。PhaseLift、PhaseCut 等算法将相位信息的求解近似为二次规划问题,运算量大,不适用于高分辨、大视场的图像相位恢复。

为了更快速、更便捷地获取高质量的恢复结果,实验者们对传统的实验装置进行了各种改进,引入各种新器件与方法。Gerchberg 等<sup>[8]</sup>利用随机编码掩模记录掩模后多个平面强度图案以求解相位。Soldevila 等<sup>[9]</sup>将微透镜阵列和探测器组合成 Shack-Hartmann(SH)传感器,将探测器放置在微透镜阵列的焦平面,微透镜的焦点位置与各个区域的波前相位相关联,但微透镜的数量、焦距及直径限制了 SH 传感器的空间分辨率、动态范围和灵敏度。

本文引入数字微镜器件(DMD)作为空间光调制器,结合随机编码图案可改善迭代算法收敛停滞、陷入局部极小值、出现伪像等情况,介绍了一种数据采集、算法收敛快速的相位成像方法,结合 DMD 衍射特性进行分析,运用差值映射(DM)算法仿真分析了不同二值化随机编码图案参数以及 DMD 参数对相位成像的影响,得出最优的调制参数,并通过实验进行验证。

## 2 原 理

根据 DMD 的工作原理,开、关分别对应数字状态 1 和 0,通过控制 DMD 上微镜的开、关实现对照明光的振幅调制。分析 DMD 调制单元大小对重建效果的影响,经 DMD 后的光场函数为<sup>[10]</sup>

$$E(\xi, \eta) = \left[ \text{rect}\left(\frac{\xi}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{a}\right) \otimes \text{comb}(d\xi) \text{comb}(d\eta) \right] \times \text{rect}\left(\frac{\xi}{pd}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{pd}\right) \otimes \sum_{m=0}^M \delta(\xi - mpd) \otimes \sum_{n=0}^N \delta(\eta - npd), \quad (1)$$

式中: $a$  为微镜尺寸; $d$  为微镜间距; $p^2$  为调制单元中微镜的数量; $pd$  为调制单元大小; $(m, n)$  表示微镜的坐标; $(\xi, \eta)$  表示微镜的空间位置; $\otimes$  为卷积符号; $M, N$  分别表示横、纵方向上的最大微镜数量; $\delta$  为狄拉克函数; $\text{comb}(\cdot)$  为狄拉克梳状函数; $\text{rect}(\cdot)$  为矩形函数。(1)式中, $\xi, \eta$  无相互影响,因此有

$$E(\xi, \eta) = E(\xi)E(\eta), \quad (2)$$

$$E(\xi) = \left[ \text{rect}\left(\frac{\xi}{a}\right) \otimes \text{comb}(d\xi) \right] \times \text{rect}\left(\frac{\xi}{pd}\right) \otimes \sum_{m=0}^M \delta(\xi - mpd). \quad (3)$$

入射光为经准直后的单色光,假设其振幅为 1,其频谱分布为

$$U(u) = \text{FFT}[E(\xi)] = \left[ \frac{a}{d} \text{sinc}(au) \text{comb}\left(\frac{u}{d}\right) \right] \otimes [pd \text{sinc}(pdu)] \times \sum_{m=0}^M \exp(-i2\pi u Mpd) = pa \left[ \text{sinc}(au) \text{comb}\left(\frac{u}{d}\right) \right] \otimes \text{sinc}(pdu) \frac{\sin[\pi u(M+1)pd]}{\sin(\pi u pd)} \exp(-i\pi u Mpd). \quad (4)$$

同理可得谱面光场函数  $U(u, v)$  为

$$U(u, v) = p^2 a^2 \left[ \text{sinc}(au) \text{sinc}(av) \text{comb}\left(\frac{u}{d}\right) \text{comb}\left(\frac{v}{d}\right) \right] \otimes [\text{sinc}(pdu) \text{sinc}(pdv)] \times \frac{\sin[\pi u(M+1)pd] \sin[\pi v(N+1)pd]}{\sin^2(\pi u pd)} \exp[-i\pi pd(uM + vN)], \quad (5)$$

式中: $(u, v)$  为谱面坐标。由(5)式可知,DMD 随机编码图案的频谱强度与调制单元大小相关,下文仿真分析了调制单元大小对相位恢复结果的影响。由于 DMD 具有高调制速度、低成本的特性,许多研究<sup>[11-13]</sup>将 DMD 用于相位成像系统中,本文利用了 DMD 的空间调制特性,并考虑到 DMD 自身的相位

影响,在实验前对 DMD 整体相位进行标定,以获得更加精确的实验结果。

DM 算法由 HIO(hybrid input-output)算法衍生而来,以单张频谱强度精确快速地求解物体相位<sup>[14]</sup>,该算法简单有效。结合实验数据,图 1(a)为利用 DM 算法求解相位的流程。

1) 随机生成  $T$  张互不重叠的随机编码图案  $O_i (i=1, 2, \dots, T)$ , 每张编码图案中处于开启状态

的显微镜数量占总体的  $1/T$ , 对这些编码图案进行膨胀处理, 具体过程如图 1(b)~(d)所示。

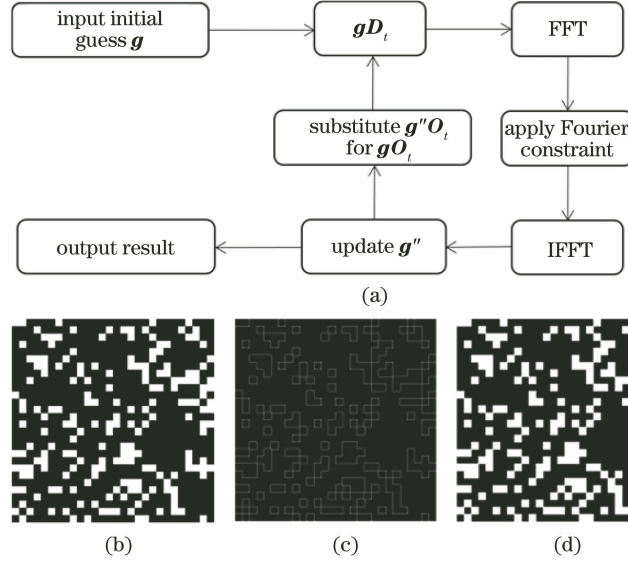


图 1 重构流程图和膨胀处理过程。(a)重构流程图;(b)初始编码图案,白色表示透过区域(下同);(c)膨胀区域;(d)膨胀后编码图案

Fig. 1 Flow chart of reconstruction process and expansion process. (a) Flow chart of reconstruction process; (b) initial coding pattern. White area indicates transmission part, similarly hereinafter; (c) expanded region; (d) expanded coding pattern

在原编码图案的基础上,将编码图案的边界向外扩张一个像素,获得  $T$  张存在一定重叠区域的图案  $D_i (i=1, 2, \dots, T)$ ,  $D_i$  为 DMD 加载图案,并给定一个初始解  $g$ 。

消除了图像间接缝的存在。本文采取的方法稳定、简单、易实施,且编码图案的大小可随样品的大小进行适应性改变,最大视场可达  $9.9 \text{ mm} \times 6.2 \text{ mm}$ 。

2) 对  $gD_i$  进行傅里叶变换,施加频域约束,  $G' = \sqrt{I} \frac{G}{|G|}$ ,  $G = \text{FFT}(gD_i)$ ,  $I$  为实际测得的傅里叶谱面强度。

### 3 仿真与实验

#### 3.1 仿真分析

3) 对  $G'$  进行傅里叶逆变换,  $g' = \text{IFFT}(G')$ , 并对  $gO_i$  区域进行更新<sup>[15]</sup>:

仿真分析了对单张编码调制图案进行恢复时,不同调制单元大小及不同显微镜的开关占比对恢复结果的影响。用 MATLAB 进行编程,并采用上述 DM 算法。以均方根误差(RMSE)以及结构相似性(SSIM)作为评价指标, RMSE 值越小、SSIM 值越大,则图像恢复效果越好,同时在仿真中加入高斯噪声  $n_{\text{gaussian}}$  以模拟存在噪声的情况下不同编码图案对重构图像精度的影响。

$$g'' = gD_i + \gamma \Delta(gD_i), \quad (6)$$

式中:  $\gamma$  为反馈系数,  $\gamma_1, \gamma_2$  为调节算法收敛速度的参数,本文中取  $\gamma_1 = \gamma_2 = \frac{1}{\gamma}$ ;  $\Delta$  为操作算子,可表示为

待恢复图像的强度、相位如图 2(a)、(b)所示,假设总区域为  $560 \times 560$  个显微镜单元( $4.3 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm}$ ),照明光为  $532 \text{ nm}$  激光, DMD 加载不同二值化随机编码图案[图 2(c)]。

$$\Delta = D_i [(1 + \gamma_2) A_{\text{mod}} - \gamma_2 Y] - A_{\text{mod}} [(1 - \gamma_1) D_i + \gamma_1 Y], \quad (7)$$

式中:  $A_{\text{mod}}(gD_i)$  表示  $gD_i \rightarrow g'$  过程的操作算子,  $Y$  为全 1 矩阵。

4)  $t=1, 2, \dots, T$  为一次循环,循环迭代步骤 2)、3), 直至得到准确度高的解。迭代开始时输入约束  $D_i$ , 结束时以  $O_i$  代替  $D_i$  输出恢复结果,在保证各幅图像之间存在一定的重叠区域的情况下进行图像恢复,这既保证了图像整体的一致性,又在很大程度上

为确保数值仿真结果的准确性,设置迭代次数为 50 次,分别对比在同一开关占比下不同调制单元大小以及在相同调制单元下不同开关占比的重建情况,对比曲线如图 3 所示。由图 3(a)、(b)可知,  $5 \leq p \leq 20$  时 RMSE 小于 0.015,  $p = 10$  时 RMSE

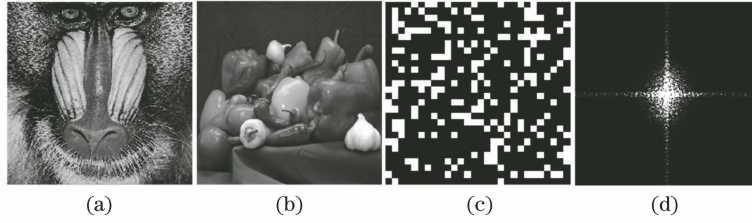


图 2 待恢复物体的强度和相位, DMD 加载的随机编码图案和傅里叶频谱强度。(a)待恢复物体的强度;  
(b)待恢复物体的相位;(c) DMD 加载的随机编码图案;(d)傅里叶频谱强度

Fig. 2 Intensity and phase of object to be recovered, random coding pattern loaded on DMD, and Fourier frequency spectrum intensity. (a) Intensity of object to be recovered; (b) phase of object to be recovered; (c) random coding pattern loaded on DMD; (d) Fourier frequency spectrum intensity

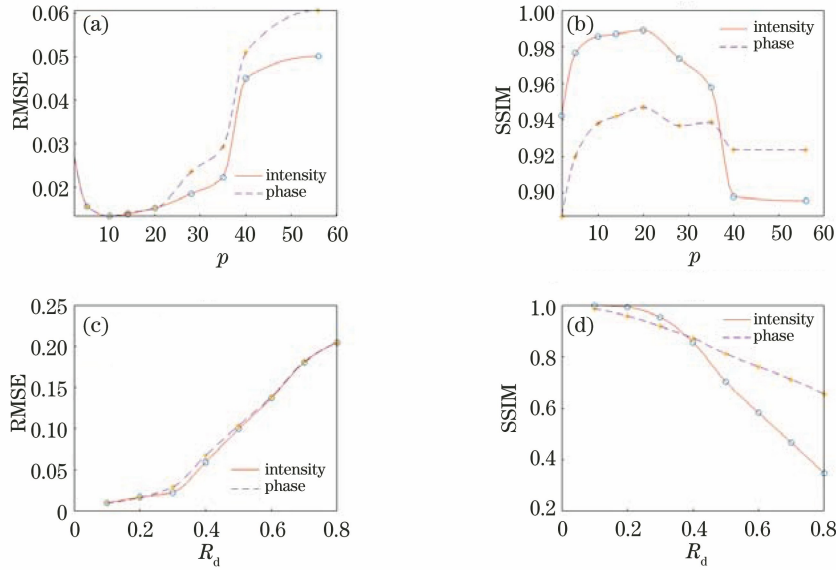


图 3 仿真结果。(a)(b)不同调制单元大小对重构图像强度、相位的影响;(c)(d)  $R_d$  对重构图像强度、相位的影响

Fig. 3 Simulation results. (a)(b) Effects of different modulation unit sizes on intensity and phase of reconstructed image;  
(c)(d) effect of  $R_d$  on intensity and phase of reconstructed image

最小;  $10 \leq p \leq 20$  时重构图像的振幅与相位 SSIM 指数较高,  $p=20$  时 SSIM 指数最高。

由(5)式可知, 谱面强度  $I_0 \propto (pa)^4$ , 图像信噪比为

$$R_{\text{SNR}} = 10 \lg \frac{\sum I_n^2}{\sum (I_n - I_0)^2} = 10 \lg \frac{u_0 v_0}{\sum (1 - I_0/I_n)^2}, \quad (8)$$

式中:  $I_n = I_0 + n_{\text{gaussian}}$  为含噪声的谱面强度;  $u_0 \times v_0$  为谱面大小。由(8)式可知, 对于固定噪声, 光强越弱, 获取图像的信噪比越低, 因此对于 DMD 上加载的随机编码图案, 其调制单元越小, 即对于固定的  $a$  值,  $p$  较小时, 低信噪比图像导致恢复结果不佳; 同时由于  $p$  受  $M = N = \frac{560}{p}$  的约束, 对于同一大小的编码图案,  $p$  值越大, 其可调制的单元数量  $MN$  越少, 加载图案的随机性无法保证, 则在恢复过程中可

能出现收敛停滞、伪像等情况。结合图 3(a), 在保证随机编码优势的基础上选择获取高图像信噪比的参数, 取  $p=20$ 。由图 3(c)、(d) 可知, 相同迭代次数情况下单张编码图案中处于开启状态的微镜数量越多, 则恢复结果越差, 由于单次恢复的信息量越多, 其恢复效果越差, 但单次开启的微镜数越少, 则需要测量的次数越多, 这是一个恢复质量与采集次数之间如何权衡的问题, 根据仿真结果,  $R_d \leq 0.3$  时图像重建质量高(其中  $R_d$  为开启微镜数占总数的比例), 为保证  $R_d$  小于 0.3, 取最少的测量次数, 即 4 次, 此时  $R_d = 0.25$ 。图 4(a)~(d)、(e)~(h) 分别给出了  $p=1, 10, 20, 40$  时强度、相位的恢复情况, 可以清晰地看出  $p$  为 10 和 20 时图像恢复质量最高, 而  $p=1$  时图像存在明显的噪点, 从而影响重构图像的质量,  $p=40$  时图像存在明显的强度差异, 此时还未收敛至最优解。

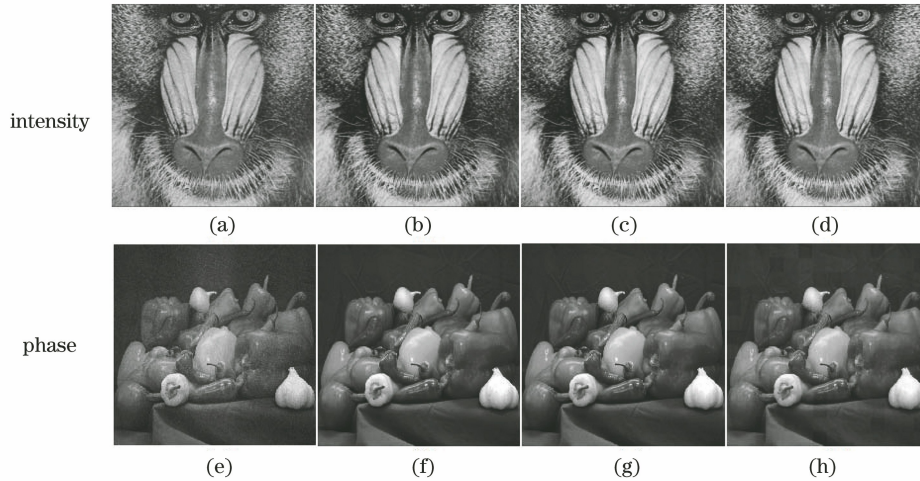


图 4 不同调制单元大小的仿真结果。(a)~(d)  $p=1,10,20,40$  对应的强度重建结果;(e)~(h)  $p=1,10,20,40$  对应的相位重建结果

Fig. 4 Simulation results for different modulation unit sizes. (a)–(d) Reconstructed intensity results corresponding to  $p=1,10,20,40$ ; (e)–(h) reconstructed phase results corresponding to  $p=1,10,20,40$

图 5、6 给出了在存在相同的高斯噪声、同样采用 4 次测量的情况下,将本文仿真分析所得参数与 Zhong 等<sup>[16]</sup>提出的改进高斯-牛顿迭代方法、PIE (ptychographic iterative engine)算法<sup>[17]</sup>以及单光束多强度重构(SBMIR)算法的结果进行比较。通过改进高斯-牛顿迭代方法测量 4 个离焦平面(距离焦面分别为  $\pm 1$  mm 和  $\pm 2$  mm)的强度信息,并通过 SBMIR 测量自由空间传播一段距离后的 4 个平面(距离待测物体为 20, 21, 22, 23 mm)的强度信息,然后进行图像恢复。

由图 5 可知,在同样测量次数下,基于二阶非线性优化的改进高斯-牛顿算法的强度恢复结果最好,本文方法得到的强度恢复质量略逊但相位恢复质量

与改进高斯-牛顿算法相近且迭代速度更快;本文方法与 SBMIR 算法相比得到的强度恢复质量相近,相位恢复质量更高。图 6(a)、(e)为本文方法得到的强度、相位恢复结果,图 6(b)、(f)为 PIE 算法的恢复结果;图 6(c)、(g)为 SBMIR 算法的恢复结果;图 6(d)、(h)为改进高斯-牛顿迭代方法的恢复结果。从图 6(g)可以看出,SBMIR 算法的相位恢复结果中存在明显的噪点,这需要更多的测量次数来弥补。而对于 PIE 算法,扫描次数越多,其恢复的图像质量越好,视场越大。由图 6(b)、(f)也可看出,4 次测量远远不够。且本文无需考虑机械移动时引入的距离误差,因此本文所提出的方法具有相位恢复质量高、结构简单、迭代速度快、测量次数少的优点。

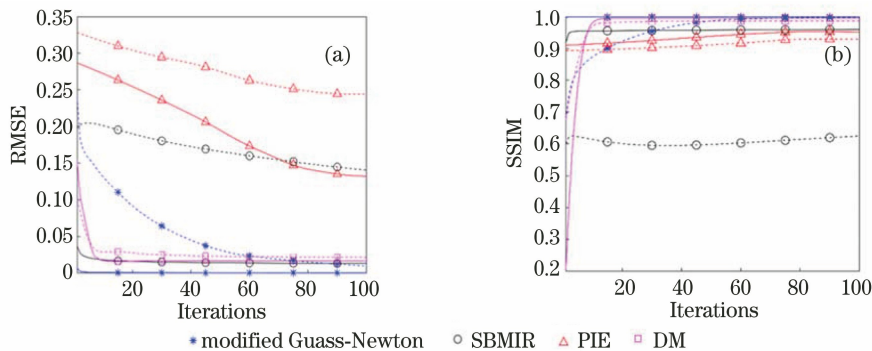


图 5 不同方法的对比曲线图(实线、虚线分别代表强度和相位)。(a) RMSE;(b) SSIM

Fig. 5 Comparison of curves of different methods (solid line and dotted line represent intensity and phase, respectively). (a) RMSE; (b) SSIM

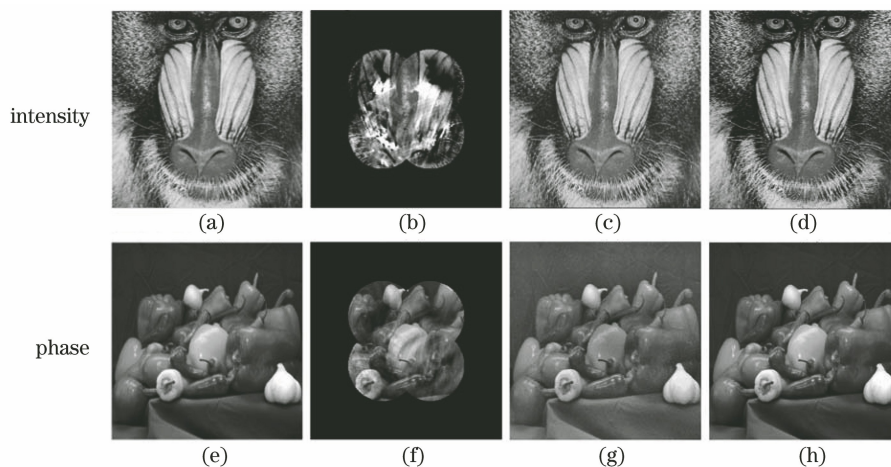


图 6 不同方法恢复的结果。(a)(e)本文方法的强度、相位恢复结果；(b)(f) PIE 算法的强度、相位恢复结果；(c)(g) SBMIR 的强度、相位恢复结果；(d)(h)改进高斯-牛顿迭代方法的强度、相位恢复结果

Fig. 6 Recovered results of different methods. (a)(e) Recovered intensity and phase results of method proposed in this paper; (b)(f) recovered results of PIE; (c)(g) recovered results of SBMIR; (d)(h) recovered results of modified Gauss-Newton method

### 3.2 实 验

本文实验装置如图 7 所示,固体激光器(PGL-FS-532 nm-10 mW,CNI Laser)发出准直光束,经中性滤波片(NE2R04B,Thorlabs)打到 DMD(DLP4500),在 DMD 上对入射光进行随机编码调制并通过  $4f$  系统( $f_1=f_2=180$  mm)将编码图案成像在物体上,最后经采集透镜( $f_3=125$  mm)和 CCD 相机 [Sony IMX253,有效分辨率为  $4112 \text{ pixel} \times 3008 \text{ pixel}$  ( $14 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ )、像素大小为  $3.45 \mu\text{m}$ ] 获取谱面强度。谱数据过采样率  $S = \frac{\lambda f_3}{r_{\text{CCD}} D_{\text{sample}}} = 4.48 \text{ Sa/s}$ , 满足奈奎斯特采样定理<sup>[18]</sup>,其中  $\lambda$  为光波波长, $r_{\text{CCD}}$  为 CCD 像元尺寸, $D_{\text{sample}}$  为样品尺寸,在本文中为  $4.3 \text{ mm}$ 。受 CCD 相机靶面大小的限制,系统的数值孔径(NA)为  $0.041$ ,系统最高分辨率  $r = \frac{\lambda}{2NA} = 6.5 \mu\text{m}$ ,随机编码图案的最小特征单元尺寸为  $153.6 \mu\text{m}$ ,远大于系统的最小分辨率。实验中通过在 CCD 相机与透镜  $L_3$  之间插入一个正透镜,来调节样品位置,以确保编码图案成像面与样品为同一平面。图 7 中 ND 为中性滤波片。

基于上述分析及装置,本文首先对 usaf1951 分辨率测试靶(R1DS1P,Thorlabs)进行实验,在 DMD 上加载 4 幅不同的随机编码图案  $D_1, D_2, D_3, D_4$ ,最小调制单元由  $21 \times 21$  个微镜组成,由  $O_1, O_2, O_3, O_4$  膨胀获得。重建结果证明了本文采用的

随机编码图案的优越性,重建视场达  $4.3 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm}$ ,如图 8(a)所示,可分辨的最细线对为第 6 组 2 号,其分辨率为  $6.9 \mu\text{m}$ ,逼近衍射极限,见插图及图 8(b),本文方法与 Gong 等<sup>[19]</sup>采用的方案相比,测量次数更少,采集数据的时间更短,迭代更快速,重建的精度也更高。

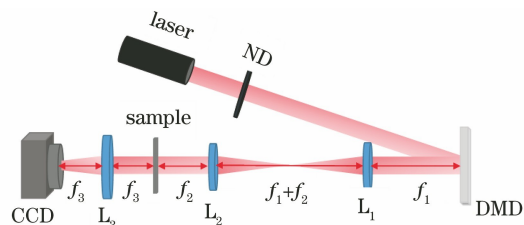


图 7 实验装置图

Fig. 7 Experimental setup

通过对存在相位变化的样品进行实验,验证本文所提出的方法在强度及相位恢复方面的优势。以人体过毛囊切片及植物根茎组织为样品,在 DMD 上加载同样的 4 张随机编码图案,实验结果如图 9 所示。图 9(a)、(e)为待测样品的强度(相机拍摄),图 9(b)、(f)为采用本文方案重建的样品强度,虽然样品经染色处理,图 9(c)、(g)中样品的相位重建结果可证明本文方案的可靠性,DMD 引入的相位误差在未标定时对图像强度的恢复没有什么影响,其相位恢复结果如图 9(d)、(h)所示,可以明显看出样品携带的相位信息被淹没在 DMD 自身的相位分布中,无法直接分辨出有效信息,因此需要对 DMD 进行标定以减小自身相位的影响。

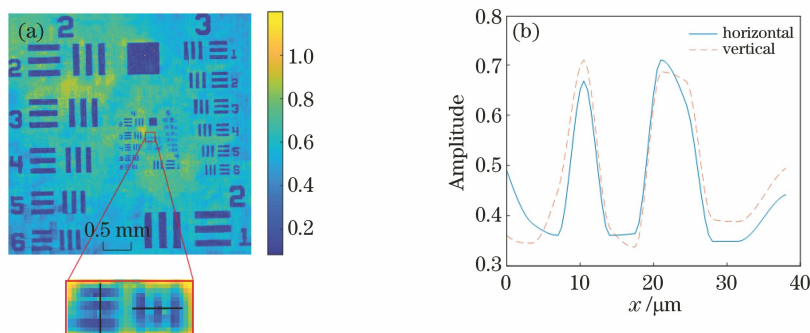


图 8 实验重建结果。(a) USAF 测试靶恢复结果,小图为第 6 组 2 号线对;(b)图 8(a)中插图线对沿黑线的强度分布

Fig. 8 Experimental reconstruction results. (a) Retrieval result of USAF test target. Illustration is enlarged region of element 2 of group 6; (b) intensity distribution of line pair along black lines in illustration

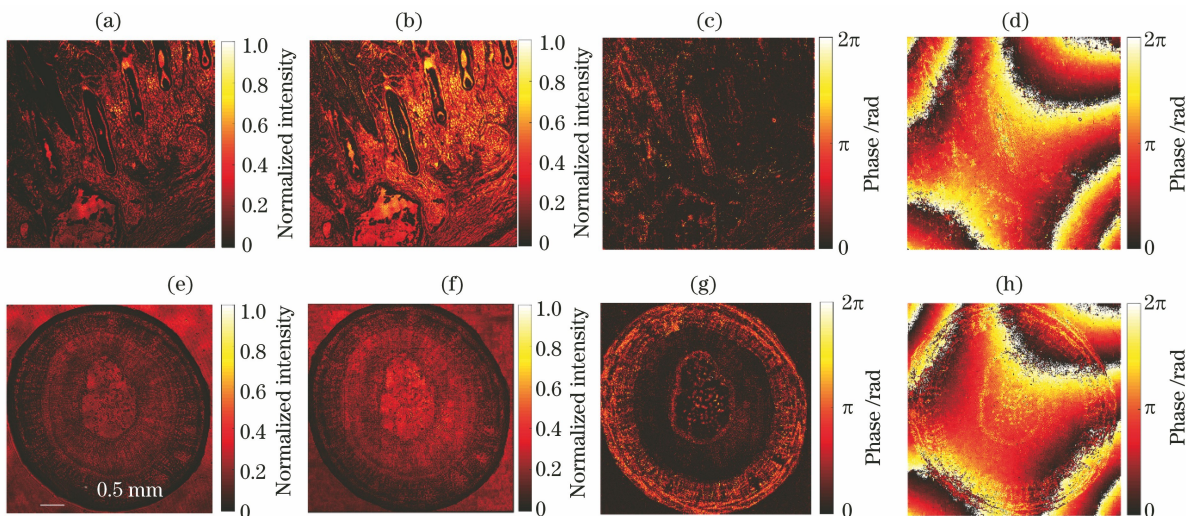


图 9 实验重建结果。(a)~(c)人体过毛囊细胞(相机拍摄)的强度、相位恢复结果;(e)~(g)植物根茎组织(相机拍摄)的强度、相位恢复结果;(d)(h) DMD 标定前人体过毛囊细胞与植物根茎组织相位恢复结果

Fig. 9 Experimental reconstruction results. (a)–(c) Recovered intensity and phase of human hair follicle cells (captured by CCD camera); (e)–(g) recovered intensity and phase of plant stem (captured by CCD camera); (d) (h) phase recovery results of plant stem and human hair follicle without calibration

为验证本文恢复结果的准确性,将待恢复物体强度与显微镜下的拍摄强度进行对比,并引入恢复结果的傅里叶频谱强度与测量所得强度的 RMSE 作为参考, RMSE 可表示为

$$R_{\text{MSE}} = \sum_{t=1}^T \sqrt{\frac{(\mathbf{I}_{\text{retrieval},t} - \mathbf{I}_{\text{measure},t})^2}{N_{\text{Fourier}}}} / T, \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{I}_{\text{measure},t}$  表示实验测得的谱面强度;  $\mathbf{I}_{\text{retrieval},t}$  表示恢复结果的傅里叶谱面强度;  $N_{\text{Fourier}}$  表示谱面总像素数。以植物根茎组织为例,将本文恢复结果与误差减少(ER)算法、平均连续映射(ASR)、SF(Solvent Flipping)<sup>[20]</sup> 进行比较。误差曲线如图 10 所示,其他三种方法的恢复结果如图 11 所示,可以看出 ER 算法的恢复效果最差[图 11(b)、(e)],细节部分噪点较多并且算法收敛速度慢, SF 算法

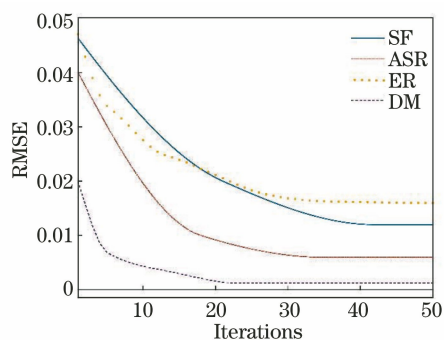


图 10 不同算法恢复结果的傅里叶频谱强度与实验测量的强度的均方根误差曲线图

Fig. 10 Root mean square error curves of Fourier spectrum intensity of recovery results of different algorithms and experimentally measured intensity

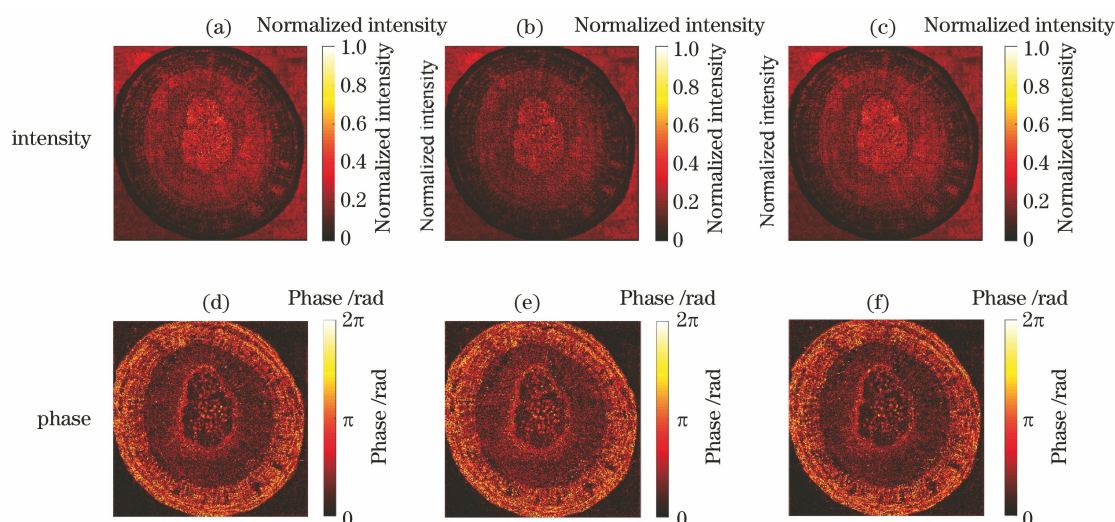


图 11 ASR、ER 和 SF 算法的重建结果。(a)(d) ASR;(b)(e) ER;(c)(f) SF

Fig. 11 Reconstruction results of ASR, ER, and SF algorithms. (a)(d) ASR; (b)(e) ER; (c)(f) SF

[图 11(c)、(f)]与 ASR 算法[图 11(a)、(d)]均已完成收敛但得到的结果差于 DM 算法,收敛较慢。

## 4 结 论

介绍了一种基于 DMD 随机编码调制的相位成像方法,根据仿真分析结果对 USAF 分辨率测试靶、人体过毛囊切片及植物根茎组织进行实验,实现了仅需 4 次测量、不足 50 次迭代下对视场为  $4.3 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm}$  的物体的重建,最高分辨率达  $6.9 \mu\text{m}$ 。与文献[19]中提出的方法相比,所提方法的测量次数更少、迭代更快速,在相近的视场大小情况下能获得更高的恢复精度;本文方法的结构简单,只需控制 DMD 来改变加载图案,无需加入位移台等机械结构,数据采集更快速且测量次数更少、迭代更快速。综上,所提方法以 DMD 为空间光调制器,基于仿真分析所得的随机编码图案参数,仅需 4 次测量即可实现高精度的重建,测量次数少,迭代恢复速度快;与干涉解相方法<sup>[21]</sup>或 PIE 成像方法<sup>[22]</sup>相比,本文方法无需引入辅助光路或机械扫描结构,结构简单,数据采集更快速。但本文方法的不足之处在于无法对透射率低的样品进行重建,下一步将对非透射物体进行相位成像。

## 参 考 文 献

- [1] Mir M, Bhaduri B, Wang R, et al. Quantitative phase imaging[M]//Progress in Optics. Amsterdam: Elsevier, 2012: 133-217.
- [2] He X, Liu C, Zhu J Q. Beam splitting amplitude modulation phase retrieval imaging[J]. Acta Optica

Sinica, 2018, 38(9): 0911002.

何西,刘诚,朱健强.基于振幅分束调制的相位恢复成像技术[J].光学学报,2018,38(9):0911002.

- [3] Chen S, Li C W, Zhang S J. Phase retrieval based on Talbot effect of Ronchi grating [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0405001.  
陈升,李常伟,张思炯.基于 Ronchi 光栅 Talbot 效应的相位恢复 [J]. 光学学报, 2018, 38 (4): 0405001.
- [4] Feng F, Li C W, Zhang S J. Wavefront reconstruction by a defocused Shack-Hartmann sensor based on moment of spot [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0628001.  
丰帆,李常伟,张思炯.离焦型 Shack-Hartmann 传感器的光斑矩波前重建 [J]. 光学学报, 2018, 38 (6): 0628001.
- [5] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. Optik, 1971, 35: 237-250.
- [6] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [7] Yang G Z, Gu B Y. On the amplitude-phase retrieval problem in optical systems [J]. Acta Physica Sinica, 1981, 30(3): 410-413.  
杨国桢,顾本源.光学系统中振幅和相位的恢复问题 [J]. 物理学报, 1981, 30(3): 410-413.
- [8] Gerchberg R W, Saxton W O. Practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. Optik, 1972, 35(2): 237-250.
- [9] Soldevila F, Durán V, Clemente P, et al. Phase imaging by spatial wavefront sampling [J]. Optica, 2018, 5(2): 164-174.



- [10] Han Q, Wang J, Xiong Z, et al. Diffraction characteristics analysis for DMD-based scene projectors in the long-wave infrared[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0504006.  
韩庆, 王健, 熊峥, 等. 用于长波红外目标模拟器的DMD衍射特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(5): 0504006.
- [11] Goorden S A, Bertolotti J, Mosk A P. Superpixel-based spatial amplitude and phase modulation using a digital micromirror device[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17999-18809.
- [12] Martínez-León L, Clemente P, Mori Y, et al. Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination [J]. *Optics Express*, 2017, 25 ( 5 ): 20342-20350.
- [13] Hu J, Shen Y B, Xie X W. Quantitative phase and amplitude imaging with an efficient support constraint [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17993-18004.
- [14] McBride W, O'Leary N L, Allen L J. Retrieval of a complex-valued object from its diffraction pattern[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(23): 233902.
- [15] Guo C, Wei C, Tan J B, et al. A review of iterative phase retrieval for measurement and encryption [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 89: 2-12.
- [16] Zhong J S, Tian L, Varma P, et al. Nonlinear optimization algorithm for partially coherent phase retrieval and source recovery[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2016, 2(3): 310-322.
- [17] Yao Y D, Liu C, Pan X C, et al. Research status and development trend of PIE imaging method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0609001.  
姚玉东, 刘诚, 潘兴臣, 等. PIE成像方法技术现状及发展趋势[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0609001.
- [18] Shannon C E. Communication in the presence of noise[J]. *Proceedings of the IRE*, 1949, 37(1): 10-21.
- [19] Gong H, Pozzi P, Soloviev O, et al. Phase retrieval from multiple binary masks generated speckle patterns [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9899: 98992N.
- [20] Marchesini S. Invited article: a unified evaluation of iterative projection algorithms for phase retrieval[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78 ( 1 ): 011301.
- [21] Ye M Z, Wang S P, Hu Y, et al. Phase retrieval methods for single interferogram with large gradient phase[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0504002.  
叶明哲, 王劲溥, 胡摇, 等. 大梯度相位单幅干涉图的解相方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0504002.
- [22] Pan X C, Liu C, Tao H, et al. Phase imaging based on ptychography and progress on related key techniques [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 ( 1 ): 0111010.  
潘兴臣, 刘诚, 陶华, 等. Ptychography相位成像及其关键技术进展 [J]. *光学学报*, 2020, 40 ( 1 ): 0111010.