

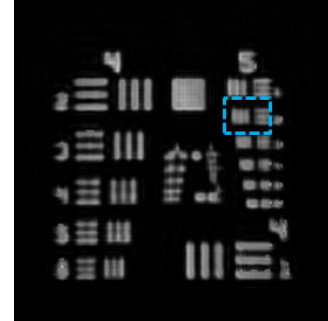


DOI: 10.12086/oe.2022.210451

结构光照明下的非相干自干涉 数字全息成像

郑梦杰, 杜艳丽*, 黄松涛, 刘 星,
李朴然, 马凤英, 弓巧侠

郑州大学物理学院(微电子学院), 河南 郑州 450001



摘要: 提出了一种采用结构光照明的迈克尔逊非相干数字全息成像系统, 该系统利用空间光调制器 SLM 实现水平和竖直方向的余弦光栅照明模式, 以提高成像系统的横向分辨率。利用 MATLAB 软件进行仿真成像和数值重建, 得到了该系统下的高分辨率重建像, 从理论上证明了这一方法可以有效提高非相干数字全息系统的分辨率。搭建了相应的非相干光自干涉数字全息成像系统, 通过对 USAF1951 分辨率板进行成像, 从实验上进一步验证了基于结构光照明的超分辨率成像方法对该成像系统的适用性。

关键词: 非相干全息; 高分辨率; 结构光照明; 迈克尔逊干涉仪

中图分类号: O438.1

文献标志码: A

郑梦杰, 杜艳丽, 黄松涛, 等. 结构光照明下的非相干自干涉数字全息成像[J]. 光电工程, 2022, 49(7): 210451

Zheng M J, Du Y L, Huang S T, et al. Incoherent self-interference digital holographic imaging under structured light illumination[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(7): 210451

Incoherent self-interference digital holographic imaging under structured light illumination

Zheng Mengjie, Du Yanli*, Huang Songtao, Liu Xing, Li Puran, Ma Fengying, Gong Qiaoxia

School of Physics and Microelectronics, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract: An incoherent digital holographic imaging system based on the Michelson interferometer with structured light illumination is proposed, which uses a spatial light modulator (SLM) to realize horizontal and vertical cosine grating illumination patterns to improve the lateral resolution of the imaging system. Using MATLAB software to carry out simulation imaging and numerical reconstruction, the high-resolution reconstructed image under the system is obtained. It theoretically proves that this method can effectively improve the resolution of the incoherent digital holography system. And build the corresponding incoherent light self-interference digital holographic imaging system. By imaging the USAF1951 resolution target, further verified the applicability of the super-resolution imaging method based on structured light illumination experimentally.

Keywords: incoherent holography; high resolution; structured light illumination; Michelson interferometer

收稿日期: 2022-01-22; 收到修改稿日期: 2022-04-27

基金项目: 河南省自然科学基金项目 (18A140032, 15A140038, 16A140035)

*通信作者: 杜艳丽, duyanli@zzu.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

1 引言

非相干数字全息术, 是一种结合全息术、光电技术与计算机技术的高质量成像技术, 与传统光学全息术相比在许多方面都存在优势。一方面, 它作为一种非相干成像技术, 使得任何被非相干光透射或反射的物体、自发光物体都可以实现全息记录, 解决了相干成像系统中存在的边缘伪影问题, 减少了相干散斑噪声, 降低了对相干光源的依赖, 提升了成像质量^[1-4]。另一方面, 作为一种数字全息术, 通过图像传感器 CCD 或 CMOS 等元件代替传统感光材料记录全息图、计算机数值模拟光学衍射过程再现全息图, 不仅减少了记录和再现时复杂的处理过程, 又可以结合多种图像处理技术来提高再现像质量^[5-8]。因此, 非相干数字全息术在过去的十几年中从不同的角度得到了广泛的研究, 例如三角全息术^[9-10]、菲涅耳非相干相关全息术^[11-16]、马赫-曾德尔全息术^[17-18]、迈克尔逊全息术^[19-23]和编码孔径相关全息术等^[24-28]。

然而, 由于衍射现象的存在, 光学系统的分辨率受到数值孔径 (NA) 的限制, 只有物体光谱的低频部分被传输, 然后被传感器记录, 因此相应的重建图像在频域中是受频带限制的。而且由于没有任何电子设备能够与光学全息术中使用的感光材料的高分辨率 (高达 5000 lp/mm) 相匹敌, 所以在大多数情况下, 非相干数字全息术实现的分辨率太低, 不适合实际应用。目前在数字全息术中已经提出了几种通过增加光学系统的 NA 来获得超分辨率成像的方法。第一种是合成孔径技术。2002 年, Massig^[29] 等人通过平移 CCD 到不同位置记录九张全息图, 并将它们重新组合成单个数字全息图来增加 NA。2006 年, Alexandrov^[30] 等人通过旋转物体并记录每个位置的数字全息图, 使原来大角度散射的光波重新收集到 CCD 内, 来打破衍射极限。同年, Mico^[31] 等人提出并演示了一种基于使用倾斜照明和共路干涉记录来提高孔径受限成像系统分辨率的方法。第二种是光栅技术。2002 年, 刘成^[32] 等人证明了可以通过在记录装置中插入衍射光栅, 利用光栅的衍射效应将原本落在 CCD 之外的高频部分光谱重新导向 CCD, 以此来获得超分辨图像。2008 年, Paturzo^[33] 提出了一种利用电光可调二维相位光栅提高数字全息显微系统分辨率的方法, 通过在马赫-曾德尔全息装置中插入一个二维六边形相位光栅, 提高了图像的二维空间分辨率。2016 年,

Kashter^[34] 通过在 SLM 加载正弦光栅实现结构光照明, 并成功应用于双透镜菲涅耳非相干相关全息系统 (FINCH)。2019 年, 宋舒杰^[35] 等人在 FINCH 中采用结构光照明模式, 实现了系统轴向分辨率的提高和光学层析成像。在上述研究中, 基于 CCD 扫描、多光束照明的合成孔径技术的实现一般依赖于高精度的压电陶瓷微位移装置, 所需成本较高, 而且在实际应用过程中, 位移装置易受到外部环境和实验平台震动的影响, 导致成像系统出现不规则抖动, 从而引起成像系统记录的全息图之间的移位和旋转; 而基于 SLM 的结构光照明技术, 只需要在实验装置中加入一个 SLM, 通过在 SLM 上加载不同的掩模, 就可以灵活实现不同方向的结构光照明, 光路简单, 对实验设置要求较低, 这些优点使得结构光照明技术在荧光显微、全息成像、三维显示等方面得到了广泛应用^[36-38]。

结构光照明技术作为一种超分辨率成像技术, 能突破系统的衍射极限, 在实现三维超分辨成像方面具有很大的潜力。因此, 本文将结构光照明技术与基于迈克尔逊干涉仪的非相干自干涉数字全息成像相结合, 提出了基于结构光照明的迈克尔逊非相干数字全息成像系统, 期望通过成像仿真和实验来探究结构光照明技术在该系统中横向的良好分辨作用, 研究结果可以为高分辨率非相干全息成像系统提供参考。

2 原理分析

结构光照明基于迈克尔逊干涉仪的非相干自干涉数字全息系统如图 1 所示。非相干光源经滤光片 F 后投射在 SLM 上, SLM 上分别加载“1”值的掩模或余弦光栅掩模, 以形成均匀光或结构光照明模式, 然后经透镜 L_0 成像在物体上。为了将 SLM 上显示的图案成像到对比度最大的物体平面上, 需要将两个相互垂直的线性偏振器 P_1 和 P_2 放置在 SLM 的两侧, 偏振方向相互正交。被照明的物体 $g(r_0)$ 上任一点源发出的光, 经过分光棱镜 BS 后被分为两列光波, 这两列光波分别通过透镜 L_1 、 L_2 后, 再被反射镜 M_1 、 M_2 反射回 BS, 经 BS 合束后, 在 CCD 相机平面上发生干涉, 形成点源全息图。物体上所有点源全息图的非相干叠加形成了物体全息图。在数字全息记录过程中, 物体到 L_1 的距离为 z_{s1} , L_1 到 M_1 的距离为 $l_1/2$, L_1 到 CCD 的距离为 z_{h1} 。物体到 L_2 的距离为 z_{s2} , L_2 到 M_2 的距离为 $l_2/2$, L_2 到 CCD 的距离为 z_{h2} , 其中透镜 L_1 和 L_2 的焦距为 f_1 和 f_2 。

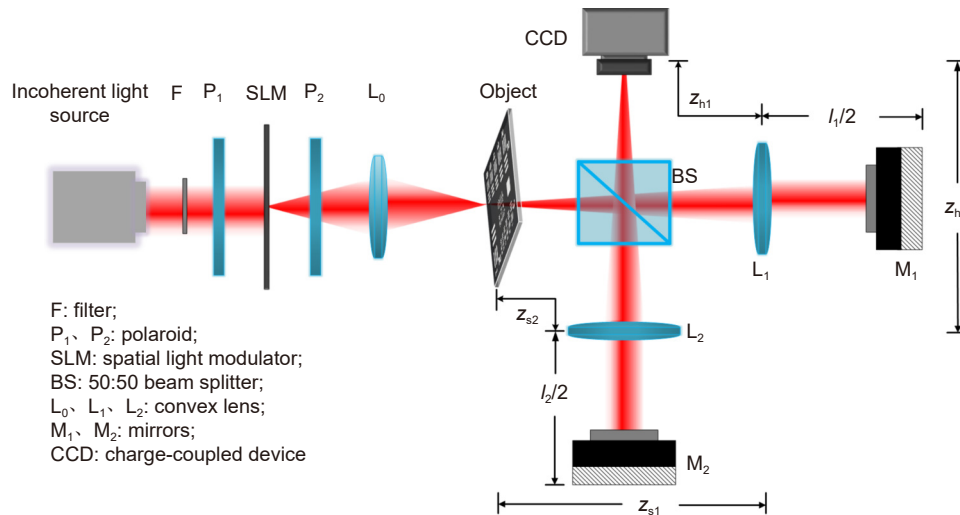


图 1 结构光照明基于迈克尔逊干涉仪的非相干自干涉数字全息系统

Fig. 1 Incoherent self-interference digital holography system based on Michelson interferometer

如图 1 所示, 在 CCD 面的全息图光强分布可以表示为物函数与系统点扩散函数的卷积。当采用结构光照明时, CCD 面接收到的物体全息图可表示为^[32]

$$h_m(r, \theta_n, \varphi_m) = [g(r_0) \cdot I_m(r_0, \varphi_m)] \otimes F_{\text{PSF}}(r, \theta_n), \quad (1)$$

式中: $g(r_0)$ 为物体的强度分布; $I_m(r_0, \varphi_m)$ 为结构光的强度分布函数; φ_m 为余弦光栅相移值, m 为结构光的相移步数, $m=1, 2, 3$; “ \otimes ” 表示卷积。 $F_{\text{PSF}}(r, \theta_n)$ 为系统的点扩散函数, θ_n 为全息图的相移量, n 为全息图的相移步数, $n=1, 2, 3$ 。

二维结构光强度分布函数是可分离变量的函数, 为了简化分析, 只给出结构光的两个方向 (x 、 y) 的表达式:

$$I_m(r_0, \varphi_m) = \begin{cases} I_0 \times [1 + \cos(2\pi k_0 x_0 + \varphi_m)] \\ I_0 \times [1 + \cos(2\pi k_0 y_0 + \varphi_m)] \end{cases}, \quad (2)$$

式中: I_0 为均匀照射的光场强度, 是一个常数, 本文取 $I_0=1/2$; k_0 为加载的结构光频率。

式 (1) 中系统的点扩散函数 $F_{\text{PSF}}(r, \theta_n)$ 可表述为

$$F_{\text{PSF}}(r, \theta_n) = \left| Q\left(\frac{1}{z_{s1}}\right) Q\left(-\frac{1}{f_1}\right) \otimes Q\left(\frac{1}{l_1}\right) Q\left(-\frac{1}{f_2}\right) \otimes Q\left(\frac{1}{z_{h1}}\right) + Q\left(\frac{1}{z_{s2}}\right) Q\left(-\frac{1}{f_2}\right) \otimes Q\left(\frac{1}{l_2}\right) Q\left(-\frac{1}{f_1}\right) \otimes Q\left(\frac{1}{z_{h2}}\right) \right|^2. \quad (3)$$

为简化表达式, 上式中 $Q(b)=\exp[i\pi b(x^2+y^2)/\lambda]$ 表示二次相位因子, λ 为记录光源的中心波长, b 为未知量。

在该系统中需要在每一个结构光相移值 φ_m 下拍摄三张物体全息图即 $h_1(r, \theta_1, \varphi_m)$ 、 $h_2(r, \theta_2, \varphi_m)$ 和 $h_3(r, \theta_3,$

$\varphi_m)$, 应用广义三步相移法^[19] 去除零级项和共轭项后叠加成一个复值全息图为

$$h_m(r, \varphi_m) = h_{m1}(r, \theta_1, \varphi_m) [\exp(-i\theta_3) - \exp(-i\theta_2)] + h_{m2}(r, \theta_2, \varphi_m) [\exp(-i\theta_1) - \exp(-i\theta_3)] + h_{m3}(r, \theta_3, \varphi_m) [\exp(-i\theta_2) - \exp(-i\theta_1)]. \quad (4)$$

在频域空间, 物体全息图为

$$H_m(k) = G(k) \otimes I_k \cdot F_{\text{OTF}}(k) = G(k) \otimes I_0 \left[\delta(k) + \frac{1}{2} e^{-i\varphi_m} \delta(k+k_0) + \frac{1}{2} e^{i\varphi_m} \delta(k-k_0) \right] \cdot F_{\text{OTF}}(k) = I_0 \left[G(k) + \frac{1}{2} e^{-i\varphi_m} G_{+1}(k+k_0) + \frac{1}{2} e^{i\varphi_m} G_{-1}(k-k_0) \right] \cdot F_{\text{OTF}}(k), \quad (5)$$

式中: k 为二维空间频域自变量; $H_m(k)$ 、 $G(k)$ 、 I_k 分别表示 $h_m(r, \varphi_m)$ 、 $g(r_0)$ 、 $I_m(r, \varphi_m)$ 的傅里叶变换; $F_{\text{OTF}}(k)$ 是光学传递函数, 为点扩散函数 $F_{\text{PSF}}(r, \theta_n)$ 的傅里叶变换; δ 为单位脉冲函数。 $G(k) \cdot F_{\text{OTF}}$ 表示均匀照明得到的像频谱。像面接收到物体频谱的大小受系统 OTF 的限制, 若系统截止频率为 k_{cut} , 则像面频率的范围为 $-k_{\text{cut}} \leq k \leq k_{\text{cut}}$ 。 $G_{+1}(k+k_0) \cdot F_{\text{OTF}}$ 和 $G_{-1}(k-k_0) \cdot F_{\text{OTF}}$ 表示由于结构光照明引入的物体 +1, -1 级高频信息, 所以此时像面频率的范围为 $-(k_{\text{cut}}+k_0) \leq k \leq k_{\text{cut}}+k_0$ 。由于光学成像系统为衍射受限系统, 结构光的空间频率 k_0 最大为系统截止频率 k_{cut} , 最多可将系统空间频率增大一倍。

对于因结构光照明所产生的混频现象, 可以采用

三相位频谱分离法即取 $\varphi_1=0^\circ$, $\varphi_2=120^\circ$, $\varphi_3=240^\circ$ (分别对应三张复值全息图的频谱为 $H_1(k)$ 、 $H_2(k)$ 、 $H_3(k)$)来将三个高低频信息进行分离:

$$G(k) \cdot F_{\text{OTF}}(k) = \frac{1}{3I_0} [H_1(k) + H_2(k) + H_3(k)],$$

$$G_{+1}(k+k_0) \cdot F_{\text{OTF}}(k) = \frac{2}{3I_0} [H_1(k) + e^{i\varphi_2} H_2(k) + e^{i\varphi_3} H_3(k)],$$

$$G_{-1}(k-k_0) \cdot F_{\text{OTF}}(k) = \frac{2}{3I_0} [H_1(k) + e^{-i\varphi_2} H_2(k) + e^{-i\varphi_3} H_3(k)]. \quad (6)$$

由于频谱 $G_{+1}(k+k_0) \cdot F_{\text{OTF}}$ 、 $G_{-1}(k-k_0) \cdot F_{\text{OTF}}$ 和 $G(k) \cdot F_{\text{OTF}}$ 的中心位置不在同一点, 需要根据傅里叶变换位移定理将其进行移位, 得到的正确位置的高频信息:

$$\begin{aligned} & F \left\{ F^{-1} \{ G_{+1}(k+k_0) \cdot F_{\text{OTF}}(k) \} \cdot \exp \left(\frac{-i2\pi k_0 r}{M_T} \right) \right\} \\ &= G_{+1}(k) \cdot F_{\text{OTF}}(k), \\ & F \left\{ F^{-1} \{ G_{-1}(k-k_0) \cdot F_{\text{OTF}}(k) \} \cdot \exp \left(\frac{-i2\pi k_0 r}{M_T} \right) \right\} \\ &= G_{-1}(k) \cdot F_{\text{OTF}}(k). \end{aligned} \quad (7)$$

将 $G(k) \cdot F_{\text{OTF}}$ 、 $G_{+1}(k) \cdot F_{\text{OTF}}$ 和 $G_{-1}(k) \cdot F_{\text{OTF}}$ 进行加权叠加, 再进行傅里叶逆变换, 得到重建像为

$$h(r) = F^{-1} \{ (G(k) + 2G_{+1}(k) + 2G_{-1}(k)) \cdot F_{\text{OTF}}(k) \}. \quad (8)$$

3 成像仿真和实验结果

3.1 成像仿真结果

图2为成像物体——负 USAF1951 分辨率板 (2048 pixels×2048 pixels), 使用 MATLAB 建立仿真系统, 设置系统参数为: 照明波长 $\lambda=632.8 \text{ nm}$, $f_1=f_2=150 \text{ mm}$, $z_{s1}=150 \text{ mm}$, $z_{s2}=152 \text{ mm}$, $l_1/2=222 \text{ mm}$, $l_2/2=220 \text{ mm}$, $z_{h1}=z_{h2}=80 \text{ mm}$, 孔径的直径 $D=1.2 \text{ mm}$, 3张全息图的相移量设为 $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=120^\circ$,

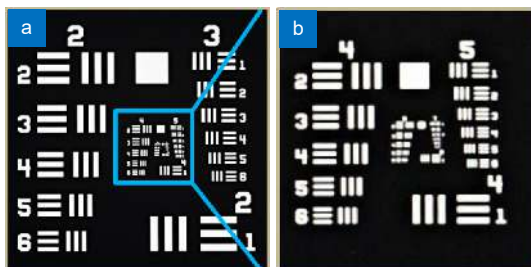


图2 成像物体。

(a) 分辨率板; (b) 图(a)中框内的放大图像

Fig. 2 Object image.

(a) The resolution target; (b) The enlarged image in the box in (a)

$\theta_3=240^\circ$ 。分辨率板经仿真系统进行成像, 得到的结果如图3所示。

图3为基于迈克尔逊干涉仪的非相干自干涉全息系统在均匀照明下的成像仿真结果。图3(a)~3(c)分别为分辨率板在相移值 θ_n 为 0° 、 120° 、 240° 的3张全息图, 图3(d)是经过三步相移算法和角谱衍射算法^[19]重建后得到的重建图, 图3(e)为图3(d)中蓝色框内的放大图像, 以便于细节观察和比较。从图中可知: 系统可以分辨至第4组第3元素, 分辨率为 20.16 lp/mm 。图3(f)为3(e)中第4组第3元素的强度分布曲线。

图4为基于迈克尔逊干涉仪的非相干自干涉全息系统在结构光照明下的成像仿真结果。具体的实现方式是: 首先, 按照式(1)将分辨率板图2(a)与空间频率为 $k_0=15 \text{ lp/mm}$ 的余弦光栅相乘, 即可得到被调制的物体如图4(a1)、4(b1)所示; 然后, 分别在三个光栅相移值 φ_m 为 0° 、 120° 、 240° 下模拟得到3张全息图, 一共得到9张全息图。按照式(2)沿着两个方向重复这个过程, 总共得到18张全息图。再利用三步相移法、三相位频谱分离法、傅里叶移位定理、不同级次频谱的叠加, 得到的成像仿真结果如图4(c)所示。

当加载水平方向的光栅时, 得到重建图4(a2), 从图中可以看出水平方向上能够分辨的最小组是第5组第2元素, 分辨率为 35.92 lp/mm , 而在垂直方向能够分辨的最小组仍是第4组第3元素, 分辨率为 20.16 lp/mm , 水平方向分辨率提高, 图4(a3)为4(a2)中第5组第2元素的强度分布曲线。当加载垂直方向的光栅时, 得到重建图4(b2), 从图中可以看出垂直方向能够分辨的最小组是第5组第2元素, 分辨率为 35.92 lp/mm , 而在垂直方向能够分辨的最小组仍是第4组第3元素, 分辨率为 20.16 lp/mm , 图4(b3)为图4(b2)中第5组第2元素的强度分布曲线。将两方向叠加重构得到图4(c), 从图中可以看出水平方向和垂直方向的分辨率均为 35.92 lp/mm , 实现了分辨率的提高。

从成像仿真结果可以看出: 负 USAF1951 分辨率板在均匀照明下系统分辨率为 20.16 lp/mm ; 在频率为 15 lp/mm 的结构光照明下系统分辨率为 35.92 lp/mm 。从而得以证明采用结构光照明相比均匀照明可以提高成像系统的分辨率。

3.2 实验结果

结构光照明基于迈克尔逊干涉仪的非相干自干涉

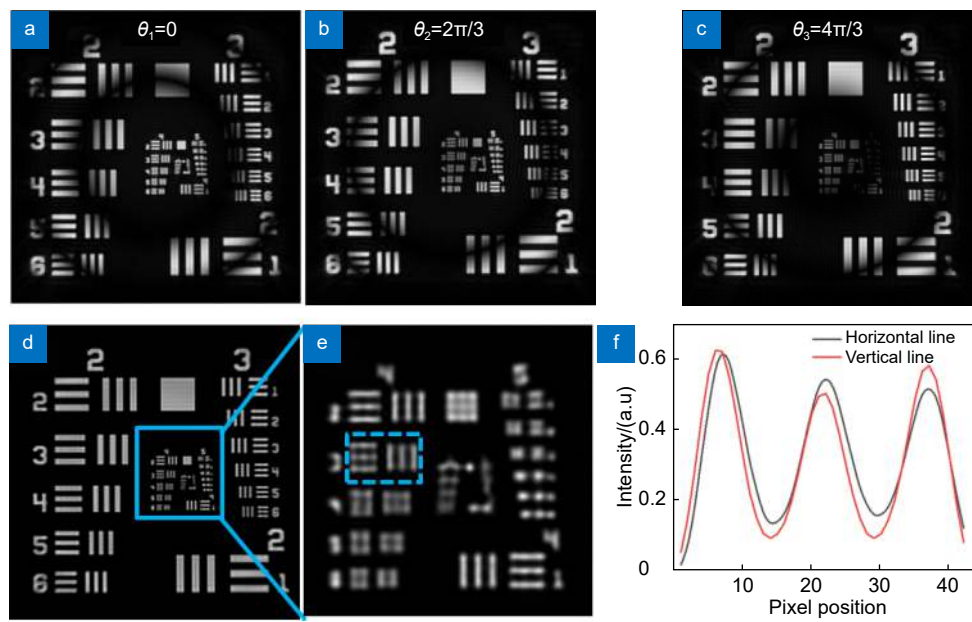


图 3 均匀光照明下分辨率板的成像仿真结果。

(a)~(c) 分辨率板的三个相移全息图; (d) 重建像; (e) 图 (d) 中蓝色框内的放大图像;
(f) 图 (e) 中蓝色虚线框内的强度分布曲线

Fig. 3 Simulated imaging results of the resolution target under uniform light illumination.

(a)~(c) Holograms with three phase shifts of the resolution target; (d) The reconstructed image;
(e) The magnified image in the blue box in (d); (f) The intensity distribution curve of the blue dashed box in (e)

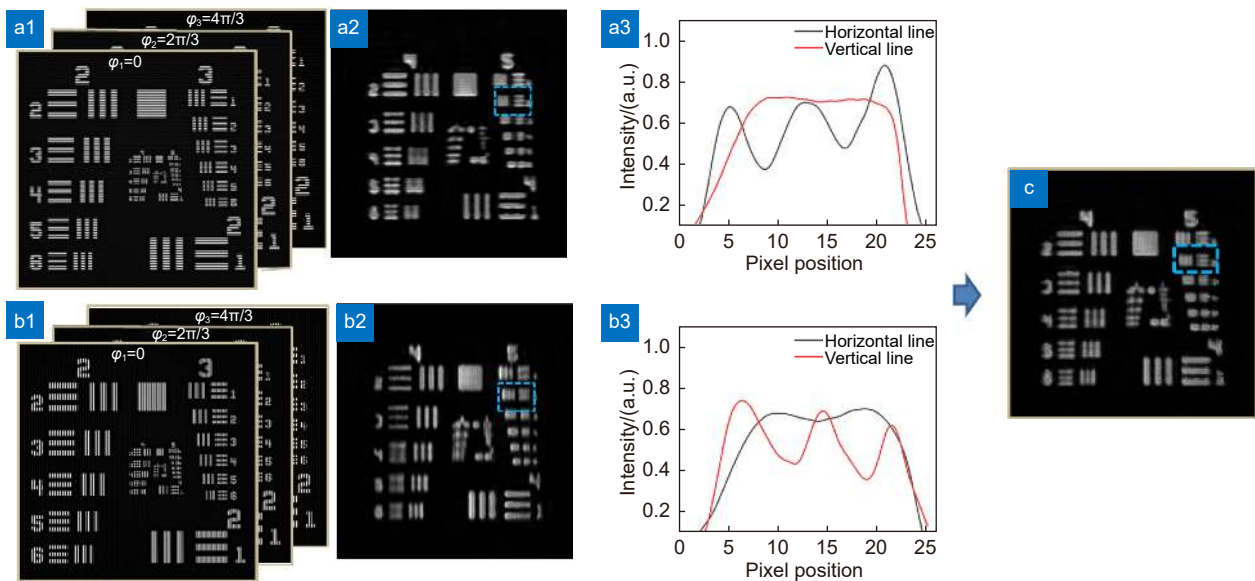


图 4 结构光照明下分辨率板的成像仿真结果。

水平方向: (a1) 经余弦光栅调制后的物体图像; (a2) 重建图像; (a3) 图 (a2) 中蓝色虚线框内的强度分布曲线;
竖直方向: (b1) 经余弦光栅调制后的物体图像; (b2) 重建图像; (b3) 图 (b2) 中蓝色虚线框内的
强度分布曲线; (c) 两方向的重建像

Fig. 4 The simulated imaging results of the resolution target under structured light illumination.

Horizontal direction: (a1) Object image modulated by cosine grating; (a2) The reconstructed images;
(a3) The intensity distribution curve of the blue dashed box in (a2);

Vertical direction: (b1) Object image modulated by cosine grating; (b2) The reconstructed images;
(b3) The intensity distribution curve of the blue dashed box in (b2); (c) The reconstructed image in both directions

数字全息系统如图 1 所示。被测物体选用 USAF 1951 分辨率板, 非相干氙灯光源 (CEL-TCX 250, 250 W) 经滤光片 F (中心波长 632.8 nm, 带宽 10 nm) 照明成像系统。 P_1 , P_2 为偏振器, 可将输入光调制为 SLM (透射式振幅型 1920 pixels×1080 pixels, 像素点尺寸 8.5 μm) 偏振敏感的方向。利用 SLM 的可编程特性, 加载不同的掩模可实现不同的照明模式, 然后经过透镜 L_0 照明在物体上。透镜 L_0 的焦距为 60 mm, SLM 到 L_0 的距离为 120 mm, L_0 到物体的距离为 120 mm。BS 到 CCD (2048 pixels×2048 pixels, 像素点尺寸 4.54 μm) 的距离为 95 mm。其他距离设置和模拟系统一致。

在 SLM 上加载“1”值的均匀矩阵来实现均匀照明, 实验结果如图 5 所示。图 5(a)~5(c) 为不同时刻拍摄的 3 张全息图, 图 5(d) 是经过广义三步相移算法和角谱衍射算法重建后得到重建图, 图 5(e) 为图 5(d) 中蓝色框内的放大图像。从图中可知, 系统可以分辨至第 5 组第 4 元素, 分辨率为 45.25 lp/mm。图 5(f) 为 5(e) 中第 5 组第 4 元素的强度分布曲线。

图 6 为基于迈克尔逊干涉仪的非相干自干涉全息

系统在结构光照明下的实验成像结果。具体的实现方式是: 在 SLM 上加载空间频率分别为 20 lp/mm, 40 lp/mm 的水平、垂直方向的余弦光栅, 经过式 (6)、式 (7)、式 (8) 的重建算法, 得到图 6(a1)、6(b1) 的分辨率板重建图像。图 6(a2)、6(b2) 分别为图 6(a1)、6(b1) 中蓝色框内的放大图像。从图 6(a2)、6(b2) 中可知: 图 6(a2) 可分辨至第 6 组第 1 元素, 分辨率为 64.00 lp/mm, 系统理论上的分辨率为 65.25 lp/mm; 图 6(b2) 可分辨至第 6 组第 4 元素, 分辨率为至 90.51 lp/mm, 系统理论上的分辨率为 85.25 lp/mm, 从而可知实验结果与理论结果较为吻合。

从实验结果可以看出, USAF1951 分辨率板在均匀照明下系统分辨率为 45.25 lp/mm; 在频率为 20 lp/mm 的结构光照明下系统分辨率为 64.00 lp/mm; 在频率为 40 lp/mm 的结构光照明下系统分辨率为 90.51 lp/mm。但是从图 6(b2) 可知, 系统分辨率 (90.51 lp/mm) 却大于系统理论的分辨率 (85.25 lp/mm), 这是因为分辨率板不能显示连续的分辨率, 成像系统的 k_{cut} 大于 45.25 lp/mm 而小于 50.80 lp/mm。从而得以证明结构光照明可以带来成像系统分辨率的提高。

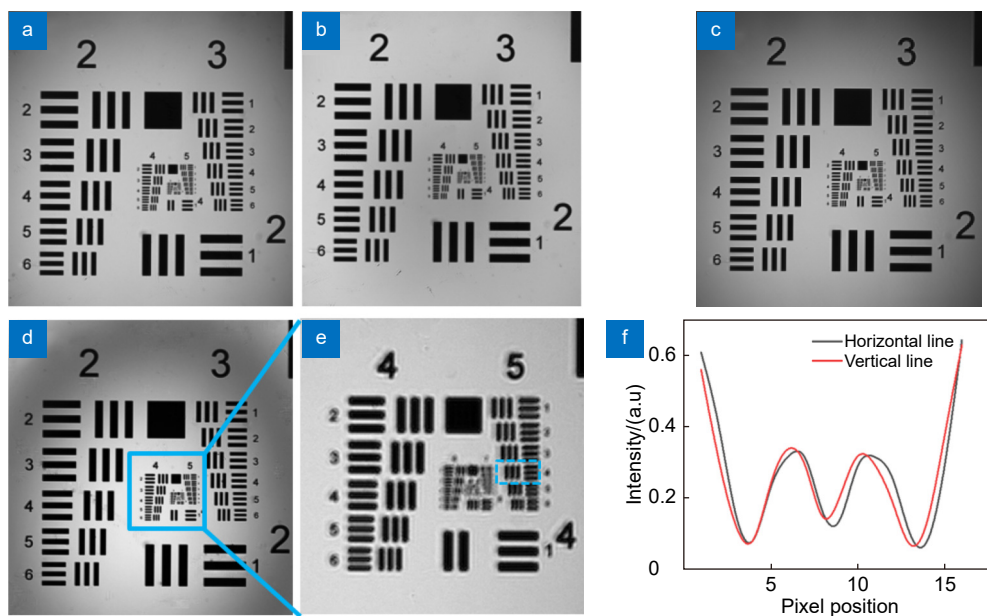


图 5 均匀光照明下分辨率板的实验成像结果。

(a)~(c) 不同时刻拍摄的三张全息图; (d) 重建像; (e) 图 (d) 中蓝色框内的放大图像;

(f) 图 (e) 中蓝色虚线框内的强度分布曲线

Fig. 5 The imaging results of the resolution target under uniform light illumination.

(a)~(c) Three holograms at different times; (d) The reconstructed image; (e) The magnified image in the blue box in (d);

(f) The intensity distribution curve of the blue dashed box in (e)

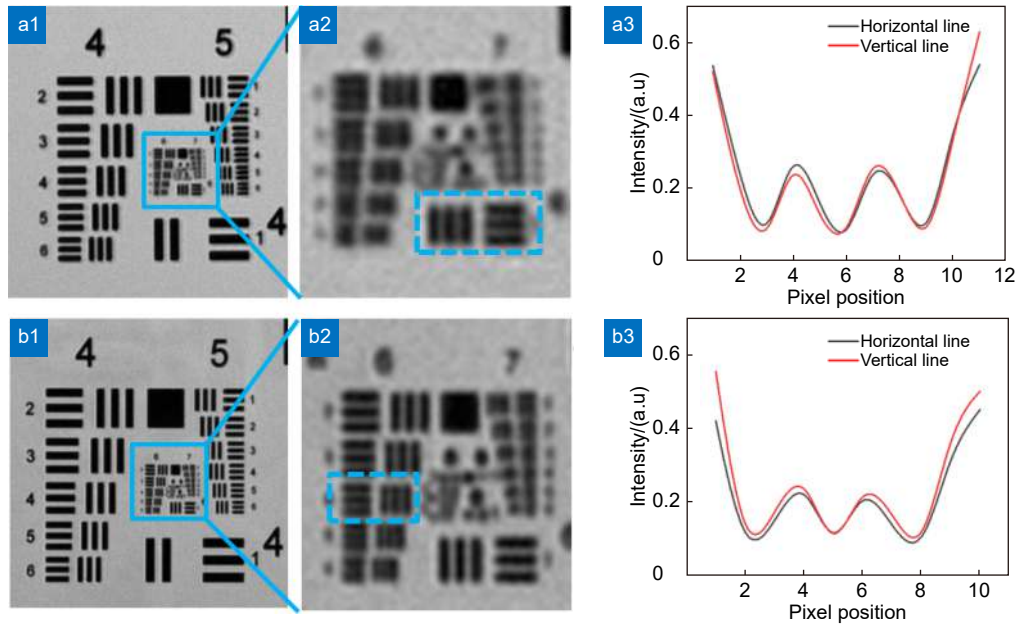


图6 不同频率的结构光照明下分辨率板的实验成像结果。

$k_0 = 20$ lp/mm: (a1) 重建像; (a2) 图(a1)中蓝色框内的放大图像; (a3) 图(a2)中蓝色虚线框内的强度分布曲线。
 $k_0 = 40$ lp/mm: (b1) 重建像; (b2) 图(b1)中蓝色框内的放大图像; (b3) 图(b2)中蓝色虚线框内的强度分布曲线

Fig. 6 The imaging results of the resolution target under structured light illumination of different frequencies.

$k_0 = 20$ lp/mm: (a1) The reconstruction image; (a2) The magnified image in the blue box in (a1);

(a3) The intensity distribution curve of the blue dashed box in (a2);

$k_0 = 40$ lp/mm: (b1) The reconstruction image; (b2) The magnified image in the blue box in (b1);

(b3) The intensity distribution curve of the blue dashed box in (b2)

4 结论

我们提出了一种将结构光照明技术应用到迈克尔逊非相干自干涉数字全息系统的新方法。通过在均匀光照明和结构光照明情况下对分辨率板进行模拟成像和实验成像, 以提高系统成像分辨率。在仿真成像结果中得出: 使用均匀光照明时系统分辨率为 20.16 lp/mm; 使用结构光照明时系统分辨率为 35.92 lp/mm, 整体分辨率提高 0.78 倍。在实验成像结果中得出: 使用均匀照明时系统分辨率为 45.25 lp/mm; 当使用频率为 20 lp/mm 和 40 lp/mm 结构光照明时, 系统分辨率为 64 lp/mm 和 90.51 lp/mm, 整体分辨率提高 0.41 倍和 1 倍。综上所述, 将结构光照明技术引入迈克尔逊非相干数字全息系统或其他自干涉系统可以显著提高成像系统的分辨率。后续, 希望在该研究中结合显微物镜实现系统的超分辨率成像。

参考文献

- [1] Stroke G W, Restrick III R C. Holography with spatially noncoherent light[J]. *Appl Phys Lett*, 1965, 7(9): 229-231.
- [2] Cochran G. New method of making Fresnel transforms with incoherent light[J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(11): 1513-1517.
- [3] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. *Appl Phys Lett*, 1967, 11(3): 77-79.
- [4] Cuhe E, Marquet P, Depeursinge C. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography[J]. *Appl Opt*, 2000, 29(23): 4070-4075.
- [5] Wang L, Feng S T, Nie S P, et al. Single exposure 3-D object digital holography based on multi-filtering technique[J]. *Laser Technol*, 2007, 31(4): 354-357.
王亮, 冯少彤, 聂守平, 等. 基于多次滤波技术的单次曝光三维物体数字全息[J]. *激光技术*, 2007, 31(4): 354-357.
- [6] Kashter Y, Rosen J. Enhanced-resolution using modified configuration of Fresnel incoherent holographic recorder with synthetic aperture[J]. *Opt Exp*, 2014, 22(17): 20551-20565.
- [7] Zhang Y Z, Wang D Y, Zhao J, et al. Investigation on phase unwrapping algorithms in digital holography[J]. *Acta Opt Sin*, 2009, 29(12): 3323-3327.
张亦卓, 王大勇, 赵洁, 等. 数字全息中实用相位解包裹算法研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3323-3327.
- [8] Man T L, Wan Y H, Wu F, et al. Self-interference compressive digital holography with improved axial resolution and signal-to-noise ratio[J]. *Appl Opt*, 2017, 56(13): F91-F96.
- [9] Kim S G, Lee B, Kim E S, et al. Resolution analysis of incoherent triangular holography[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(26): 4672-4678.
- [10] Kim S C, Lee S E, Kim E S. Optical implementation of real-time Incoherent 3D imaging and display system using modified triangular interferometer[J]. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, 2004, 5443: 250-256.
- [11] Rosen J, Brooker G. Digital spatially incoherent Fresnel

- holography[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(8): 912–914.
- [12] Zang R H, Tang M Y, Duan Z Y, et al. Fresnel incoherent correlation holography with phase-shifting technology[J]. *Infrared Laser Eng*, 2019, **48**(8): 825001.
臧瑞环, 汤明玉, 段智勇, 等. 菲涅耳非相干相关全息相移技术[J]. *红外与激光工程*, 2019, **48**(8): 825001.
- [13] Ren H, Bu Y Z, Wang X, et al. Incoherent digital holographic color imaging with high accuracy image registration[J]. *Infrared Laser Eng*, 2020, **49**(10): 20200022.
任宏, 卜远壮, 王茜, 等. 高图像配准精度的非相干数字全息彩色成像[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(10): 20200022.
- [14] Bu Y Z, Wang X, Li Y, et al. Tunable edge enhancement by higher-order spiral Fresnel incoherent correlation holography system[J]. *J Phys D Appl Phys*, 2021, **54**(12): 125103.
- [15] Ma F Y, Wang Xi, Bu Y Z, et al. Incoherent digital holographic spectral imaging with high accuracy of image pixel registration[J]. *Chin Phys B*, 2021, **30**(4): 044202.
- [16] Vijayakumar A, Katkus T, Lundgaard S, et al. Fresnel incoherent correlation holography with single camera shot[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3**(8): 200004.
- [17] Lee H C, Kim S H, Kim D S. Two step on-axis digital holography using dual-channel mach-zehnder interferometer and matched filter algorithm[J]. *J Opt Soc Korea*, 2010, **14**(4): 363–367.
- [18] Naik D N, Pedrini G, Takeda M, et al. Spectrally resolved incoherent holography: 3D spatial and spectral imaging using a Mach-Zehnder radial-shearing interferometer[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(7): 1857–1860.
- [19] Kim M K. Full color natural light holographic camera[J]. *Opt Exp*, 2013, **21**(8): 9636–9642.
- [20] Li D Y, Du Y L, Zhang W B, et al. Study of incoherent on-axis digital holography imaging system[J]. *J Optoelectron-Laser*, 2015, **26**(6): 1157–1161.
李德阳, 杜艳丽, 张文斌, 等. 非相干同轴数字全息成像系统研究[J]. *光电子·激光*, 2015, **26**(6): 1157–1161.
- [21] Zhang W B, Liu Y F, Li D Y, et al. Incoherent digital holographic microscopic imaging based on Michelson interferometer[J]. *Chin J Lasers*, 2017, **44**(3): 0309001.
张文斌, 刘亚飞, 李德阳, 等. 基于迈克耳孙干涉仪的非相干数字全息显微成像[J]. *中国激光*, 2017, **44**(3): 0309001.
- [22] Zhang M M, Tian Z Y, Xiong Y K, et al. Research on incoherent self-interference digital holography imaging technology[J]. *Infrared Laser Eng*, 2019, **48**(12): 1224001.
张敏敏, 田珍耘, 熊永康, 等. 非相干光自干涉数字全息成像技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, **48**(12): 1224001.
- [23] Xiong Y K, Zheng M J, Zhang M M, et al. Research on incoherent self-reference digital holography imaging system[J]. *Opt Eng*, 2021, **60**(4): 043102.
- [24] Vijayakumar A, Kashter Y, Kelner R, et al. Coded aperture correlation holography—a new type of incoherent digital holograms[J]. *Opt Exp*, 2016, **24**(11): 12430–12441.
- [25] Kumar M, Vijayakumar A, Rosen J. Incoherent digital holograms acquired by interferenceless coded aperture correlation holography system without refractive lenses[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 11555.
- [26] Kumar M, Vijayakumar A, Rosen J, et al. Interferenceless coded aperture correlation holography with synthetic point spread holograms[J]. *Appl Opt*, 2020, **59**(24): 7321–7329.
- [27] Ru H W, Wu L L, Zhang W X, et al. Full-field heterodyne white light interferometry[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(2): 190617.
汝洪武, 吴玲玲, 张文喜, 等. 全视场外差白光干涉测量技术[J]. *光电工程*, 2020, **47**(2): 190617.
- [28] Shi X Y, Wang D Y, Rong L, et al. Phase contrast imaging based on continuous-wave terahertz digital holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(5): 190543.
史晓玉, 王大勇, 戎路, 等. 连续太赫兹波数字全息相衬成像[J]. *光电工程*, 2020, **47**(5): 190543.
- [29] Massig J H. Digital off-axis holography with a synthetic aperture [J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(24): 2179–2181.
- [30] Alexandrov S A, Hillman T R, Gutzler T, et al. Synthetic aperture Fourier holographic optical microscopy[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **97**(16): 168102.
- [31] Mico V, Zalevsky Z, Garcia-Martinez P, et al. Synthetic aperture superresolution with multiple off-axis holograms[J]. *J Opt Soc Am A*, 2006, **23**(12): 3162–3170.
- [32] Liu C, Liu Z G, Bo F, et al. Super-resolution digital holographic imaging method[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **81**(17): 3143–3145.
- [33] Paturzo M, Merola F, Grilli S, et al. Super-resolution in digital holography by a two-dimensional dynamic phase grating[J]. *Opt Exp*, 2008, **16**(21): 17107–17118.
- [34] Kashter Y, Vijayakumar A, Miyamoto Y, et al. Enhanced super resolution using Fresnel incoherent correlation holography with structured illumination[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(7): 1558–1561.
- [35] Song S J, Wang Y H, Han Y, et al. Self-interference digital holography with structured light illumination for tomographic imaging[J]. *Chin J Lasers*, 2019, **46**(5): 0509001.
宋舒杰, 王玉红, 韩影, 等. 结构光照明的自干涉数字全息层析成像[J]. *中国激光*, 2019, **46**(5): 0509001.
- [36] Shao Y H, Zheng X M, Wang L, et al. Two-photon virtual structured illumination microscopy[J]. *J Shenzhen Univ (Sci Eng)*, 2021, **38**(3): 221–226.
邵永红, 郑晓敏, 汪磊, 等. 虚拟结构光照明双光子荧光显微成像[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2021, **38**(3): 221–226.
- [37] Hao X, Yang Q, Kuang C F, et al. Optical super-resolution imaging based on frequency shift[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, **41**(1): 0111001.
郝翔, 杨青, 匡翠方, 等. 光学移频超分辨成像技术进展[J]. *光学学报*, 2021, **41**(1): 0111001.
- [38] Jeon P, Kim J, Lee H, et al. Comparative study on resolution enhancements in fluorescence-structured illumination Fresnel incoherent correlation holography[J]. *Opt Exp*, 2021, **29**(6): 9231–9241.

作者简介



郑梦杰(1993-), 女, 硕士研究生, 现就读于郑州大学物理学院(微电子学院)光学专业, 主要从事非相干数字全息成像方面的研究工作。

E-mail: zhengmj1209@163.com

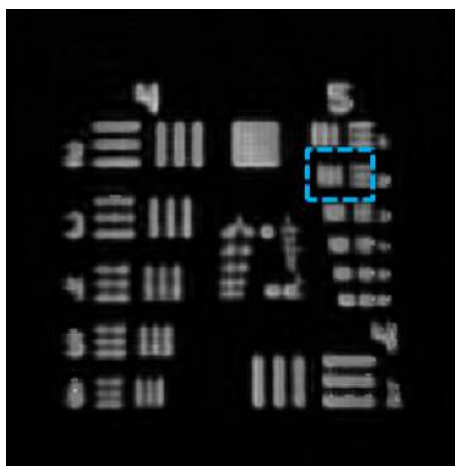


【通信作者】杜艳丽(1979-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师。长期从事光电技术、数字与信息光学及成像技术的研究。主持 10 余项省厅级科研项目, 在国内外学术期刊发表论文 30 余篇, 多次获得河南省高等教育教学成果奖。

E-mail: duyanli@zzu.edu.cn

Incoherent self-interference digital holographic imaging under structured light illumination

Zheng Mengjie, Du Yanli*, Huang Songtao, Liu Xing, Li Puran, Ma Fengying, Gong Qiaoxia



The simulated imaging results of the resolution target under structured light illumination

Overview: As a super-resolution optical imaging technology, structured light illumination technology carries an object's high-frequency information into the optical system in the form of moiré fringes through structured illumination, breaking the diffraction limit in traditional optical imaging and improving image resolution. An incoherent self-interference digital holography based on the Michelson interferometer can accurately record an object's phase and intensity information. It has the characteristics of fast real-time, non-contact, non-marking, three-dimensional imaging, etc., and has essential research significance in biomedical imaging and materials science. In this paper, an incoherent digital holographic imaging system based on the Michelson interferometer with structured light illumination is proposed, which uses a spatial light modulator (SLM) to realize horizontal and vertical cosine grating illumination patterns to improve the lateral resolution of the imaging system. Perform simulation and verification experiments in uniform and structured light illumination mode to explore the high-resolution imaging results of the resolution target. We obtained in simulation imagings: First, the resolved minimum element of the resolution target is Group 4 element 3 (20.16 lp/mm) in Figure 3(e) under uniform light illumination. Then, the algorithm is used to modulate the resolution target to realize the structured light illumination mode. The resolved minimum resolution element of the resolution target is Group 5 element 2 (35.92 lp/mm) in Figure 4(c). We get in the verification experiments: First, use the algorithm to generate a mask with a value of 1 on the SLM to adjust the illumination mode to the uniform light illumination mode, and the resolved minimum resolution element of the resolution target is the Group elements 4 (45.25 lp/mm) in Figure 5(e). Using another algorithm to load cosine gratings of 20 lp/mm and 40 lp/mm on the SLM to adjust the illumination mode to structured light illumination mode, the resolved minimum element of the resolution target is Group 6 element 1 (64 lp/mm) and Group 6 element 4 (90.51 lp/mm) in Figure 6(a1) and Figure 6(b1). The applicability of the super-resolution imaging method based on the structured light illumination to the incoherent light self-interference digital holographic imaging system based on the Michelson interferometer is verified from the level of simulation imaging and experiments, and the resolution of the imaging system is improved. In the future, it is necessary to comprehensively consider the system performance, optimize the system structure, study more effective numerical algorithms, and realize super-resolution imaging, dynamic imaging, color imaging, etc., to obtain more excellent development space.

Zheng M J, Du Y L, Huang S T, et al. Incoherent self-interference digital holographic imaging under structured light illumination[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(7): 210451; DOI: [10.12086/oe.2022.210451](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210451)

Foundation item: Natural Science Foundation of Henan Province of China (18A140032, 15A140038, and 16A140035)

School of Physics and Microelectronics, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

* E-mail: duyanli@zzu.edu.cn