

结构光照明的自干涉数字全息层析成像

宋舒杰, 万玉红*, 韩影, 满天龙

北京工业大学应用数理学院, 北京 100124

摘要 发展了一种采用结构光照明提高自干涉数字全息成像系统轴向分辨率的方法, 理论分析了结构光照明自干涉数字全息层析成像的原理, 采用数值模拟和实验研究了结构光空间频率和样品轴向间距对系统层析成像特性的影响, 给出了结构光照明模式下自干涉数字全息成像的结果。研究表明, 结构光照明的自干涉数字全息系统层析成像能力得到了显著提升。

关键词 全息; 自干涉; 结构光照明; 层析成像; 分辨率

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0509001

Self-Interference Digital Holography with Structured Light Illumination for Tomographic Imaging

Song Shujie, Wan Yuhong*, Han Ying, Man Tianlong

College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The self-interference digital holographic imaging system with structured light illumination is developed to improve the axial imaging resolution and its basic principle is demonstrated. The numerical simulation and experiment are conducted to investigate the effects of the spatial frequency of the structured light and the axial distance of the sample on the tomographic imaging performances of the system. The results show that self-interference digital holographic imaging under structured light illumination can considerably improve the tomographic imaging capability.

Key words holography; self-interference; structured light illumination; tomographic imaging; resolution

OCIS codes 090.1995; 110.6955; 170.0110

1 引言

光学显微成像技术的应用与发展极大地推动了人们对生命现象的研究与认知。宽场超分辨率光学三维显微成像技术在生物医学诊断和生命科学研究领域有着不可估量的作用。非相干数字全息术是近年来发展的一种非扫描三维成像技术, 是一种极具潜力的宽场超分辨率显微成像技术。2007 年, Rosen 课题组^[1]提出了菲涅耳非相干关联数字全息术(FINCH), 该技术是将空间中物体上同一点发出的光分束后, 利用物体的空间自相干特性实现点源全息图的记录, 以及所有点源全息图的非相干叠加, 从而实现空间非相干光照明样品或荧光样品全息图的记录。非相干数字全息术摆脱了对相干光源的依

赖, 拓展了数字全息技术的应用领域, 可应用于超分辨率显微成像^[2-3]、非相干物体彩色成像^[4-5]、自适应光学^[6]等领域。

自干涉数字全息术可以借助一些特殊光路配置来实现非相干光照明下物体全息图的记录^[7-10]。通常采取的方式是在同轴光路配置下利用空间光调制器上加载相位掩模实现衍射分光 and 相移, 进而实现全息图的记录。衍射分光保证来自物体上同一点源的光被分为两束后在适当位置干涉形成物体的点源全息图, 通过不同点源全息图的叠加实现物体非相干全息图的记录。由于物光和参考光来源于同一物点, 具有空间自干涉特性, 所以该技术也称为自干涉数字全息。空间光调制器上相移的引入是为了在全息图再现过程中消除零级项和共轭像的干扰。由于

收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2018-10-30; 录用日期: 2019-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(61575009)、北京市自然科学基金(4182016)

* E-mail: yhongw@bjut.edu.cn

非相干全息图是由多个点源全息图非相干叠加而成的,每个点源全息图编码了其对应物点的三维位置信息,所以理论上可以对三维物体的任意一个深度的平面信息进行清晰的再现,实现三维层析成像。但由于受到实际成像系统有限的轴向分辨率的限制,自干涉数字全息技术三维层析成像性能尚难以达到理论预期。提高自干涉数字全息成像技术的轴向分辨率是该技术当前研究的关键问题之一。Kelner 等^[11]在自干涉数字全息光路的探测器前加入针孔,结合共聚焦显微术,通过扫描实现了横向分辨率的提高和光学层析成像。Siegel 等^[12]将 FINCH 与共焦技术相结合,在系统中加入 Nipkow 圆盘,减小了 FINCH 的焦深,实现了横向分辨率的提高和光学层析成像。但是将 FINCH 与共焦成像相结合实现层析成像,却在一定程度上降低了系统的成像视场和成像速度。Man 等^[13]将自干涉数字全息与压缩感知算法相结合,在不损失成像速度和成像视场的前提下,利用压缩重建算法提高了系统成像的轴向分辨率和信噪比。Kashter 等^[14]将结构光照明技术与自干涉数字全息相结合实现了 FINCH 系统的横向超分辨率成像。但是在自干涉数字全息中采用结构光的照明模式实现层析成像还有待进一步研究。

结构光照明成像是一种光学层析技术,同时也是一种宽场横向超分辨率成像技术,能够实现三维超分辨率成像,并且自干涉数字全息技术能够在单幅全息图中记录物体的三维信息,具有非扫描、快速成像的特性。本文将结构光照明成像技术与自干涉数字全息成像相结合,探究了系统的层析成像特性,研究了结构光空间频率、样品轴

向间距对自干涉数字全息层析成像特性的影响,为提高自干涉数字全息三维层析成像质量提供了一种方法。

2 基本原理

结构光照明自干涉数字全息成像系统示意图如图 1 所示。 O_1 表示三维物体的一个深度平面,实验中该平面处放置一个二维物体 O_1 ; O_2 表示三维物体的另一个深度平面,实验中该平面处放置另一个二维物体 O_2 。通过在 SLM 上加载二维光栅的方式实现结构光照明。光源发出的光经过窄带滤波和起偏后照射到空间光调制器(SLM₁)上,SLM₁ 加载固定周期的振幅型余弦光栅,该光栅通过透镜 L_1 成像到 O_1 上。 u 表示 SLM₁ 到透镜 L_1 的距离, v 表示 L_1 到 O_1 的距离。经结构光调制的物信息继续传播,经后面的透镜和空间光调制器 SLM₂ 衍射分光后,两束光在电荷耦合器件(CCD)平面上干涉,生成物体 O_1 、 O_2 的全息图。若要记录结构光调制 O_2 时的物信息,通过适当调整透镜 L_1 的位置,使光栅在 O_2 平面处成清晰的像即可。在 FINCH 成像过程中, O_1 与透镜 L_2 间的距离为 z_s , L_2 与 SLM₂ 间的距离为 d ,透镜 L_2 的焦距为 f_L ,空间光调制器 SLM₂ 上加载一个透镜的包裹相位作为衍射分光元件,透镜的焦距为 f_{SLM} ,物体 O_1 经透镜 L_2 和 SLM₂ 分光后得到两个像 S_1 和 S_2 ,物体 O_2 经透镜 L_2 和 SLM₂ 分光后得到两个像 S'_1 和 S'_2 。SLM₂ 到 S_1 的距离为 z_1 ,到 S_2 的距离为 z_2 ,SLM₂ 到 CCD 的距离为 z_h , x_1 、 y_1 表示 SLM₁ 的笛卡尔坐标, x'_0 、 y'_0 和 x_0 、 y_0 分别表示物体 O_2 和 O_1 的笛卡尔坐标, x 、 y 表示 CCD 记录平面的坐标。

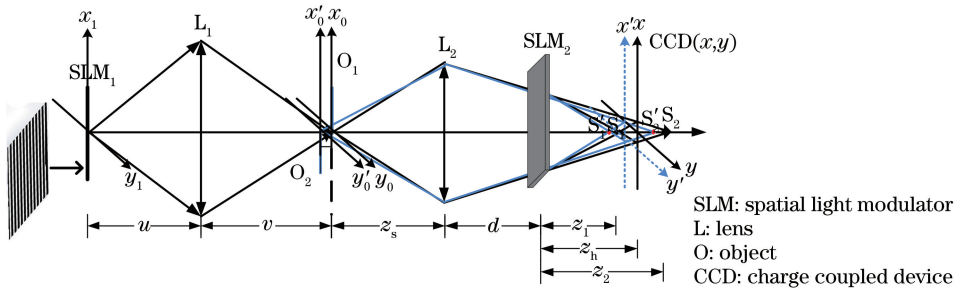


图 1 结构光照明 FINCH 原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of FINCH with structured light illumination

如图 1 所示,全息图在 CCD 平面的光强分布可以表示为物体的理想几何像与系统点源全息图的卷积。当采用结构光照明时,CCD 平面接收到的物体全息图可以表示为

$$i_{mn}(x, y) = [O(x, y)g_n(x, y, \varphi_n)] \otimes p_m(x, y, \theta_m), \quad (1)$$

式中: $O(x, y)$ 为物体的强度分布; $g_n(x, y, \varphi_n)$ 为结构光的强度分布函数; φ_n 为 SLM₁ 上加载的相移

值, n 为结构光的相移步数, $n=1, 2, 3$; \otimes 表示卷积运算; $p_m(x, y, \theta_m)$ 为系统的点源全息图, 即成像系统的点扩展函数; θ_m 为 SLM₂ 上加载的掩模相移值, m 为 FINCH 的相移步数, $m=1, 2, 3, 4$ 。

二维方向的结构光强度分布函数是可分离变量的函数, 为了简化分析, 只给出二维结构光一个方向 (x) 的表达式

$$g_n(x, \varphi_n) = I_0 [1 + q \cos(2\pi k_0 x + \varphi_n)], \quad (2)$$

式中: k_0 为 SLM₁ 上加载的光栅的空间频率; q 为光栅调制度; I_0 为常数。

(1) 式中, 物体上任一点经过系统产生的点源全息图的具体形式为

$$p_m(x, y, \theta_m) = \left| Q\left(\frac{1}{z_s}\right) Q\left(\frac{-1}{f_L}\right) \otimes Q\left(\frac{1}{d+z_h}\right) \exp(j\theta_m) + Q\left(\frac{1}{z_s}\right) Q\left(\frac{-1}{f_L}\right) \otimes Q\left(\frac{1}{d}\right) Q\left(\frac{-1}{f_{SLM}}\right) \otimes Q\left(\frac{1}{z_h}\right) \right|^2. \quad (3)$$

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

FINCH 系统全息记录时采用的同轴光路需要结合相移技术去除零级项和孪生像对全息图再现像的干扰, 采用四步相移技术分别记录, 以合成复值全息图 $i_n(x, y)$:

$$i_n(x, y) = i_{1n}(x, y) - i_{3n}(x, y) - j[i_{2n}(x, y) - i_{4n}(x, y)], \quad (4)$$

式中: $i_{1n}, i_{2n}, i_{3n}, i_{4n}$ 分别为 4 幅带有不同相移值的相移全息图, 在计算机中对复值全息图进行再现, 就是对全息图与菲涅耳衍射传播的脉冲响应 $h(x, y)$ 做卷积运算, 得到的重建像 $I_n(x, y)$ 可表示为

$$I_n(x, y) = i_n(x, y) \otimes h(x, y). \quad (5)$$

如果再再现距离是对应物体平面 1 (O_1) 的最佳再现距离, 则重建像 $I_n(x, y)$ 中包含物体平面 1 的在焦信息 (清晰再现像) $I_{in}(x, y)$ 和物体平面 2 (O_2) 的信息 $I_{out}(x, y)$, 即

$$I_n(x, y) = I_{in}(x, y) + I_{out}(x, y). \quad (6)$$

由于系统成像性能的限制, O_2 的信息势必会对 O_1 造成一定干扰, 影响层析成像的质量。当系统采用结构光照明时, $I_{in}(x, y) = g_n(x, y)O(x, y)$, $I_{out}(x, y)$ 表示应该被抑制或去除的串扰噪声。

将(2)式代入(6)式展开得到:

$$I_n = I_0 + I_a \cos \varphi_n + I_b \sin \varphi_n + I_{out}, \quad (7)$$

式中: I_0 为传统宽场成像。为了方便区分, 将 I_a 和

I_b 作为由余弦函数展开产生的图像。为消除加载在物体上的结构光条纹以及产生的离焦信息, 采用三步相移取均方根的方法得到 $(I_a^2 + I_b^2)^{1/2}$, 即最终的层析像

$$I_{sec} = [(I_1 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_3)^2]^{1/2}, \quad (8)$$

将三幅图相加取平均值即可得到宽场成像的结果:

$$I_{WF} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}, \quad (9)$$

式中: I_1, I_2, I_3 分别为对应相位 $\varphi_n = 0, 2\pi/3, 4\pi/3$ 的像。

通过理论分析可知, 结构光照明自干涉数字全息层析成像需要将一定空间频率的条纹投影或成像到物体上。根据透镜的成像特性, 采用的结构光条纹只有在其共轭像面上能成清晰的像。如果是具有一定厚度的三维物体, 则只有在物体的某一个深度平面上加载上清晰的条纹, 且条纹成像的对比度会随着离焦距离增加而迅速衰减, 使其他深度的物信息无法受到条纹的有效调制。结合层析和宽场再现算法对所记录的全息图进行再现, 在去除结构光条纹的同时可以有效抑制其他深度平面的离焦信息, 而对于受调制的某一深度平面的物信息则可以无串扰再现, 从而提升了层析成像的质量^[15]。

3 结构光照明自干涉数字全息成像特性

3.1 实验方法

实验光路图如图 2 所示, 光源 LED 的中心波长为 625 nm, 带宽为 16 nm。 O_1, O_2 为两个透射型二维物体, 分别位于光路中不同的轴向位置; P_1, P_2, P_3 为偏振片, P_1 与 P_2 的透振方向垂直, P_2 的透振方向平行于 P_3 。 L_1, L_2, L_3 透镜的焦距分别为 150, 50, 150 mm。 BS 为分光镜。 SLM₁ 为振幅型空间光调制器 (TSLM16U-A, 共创光电公司, 西安), 像素数为 2048×1536 , 像素大小为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ 。 SLM₂ (PLUTO, Holoeye 公司, 德国) 为相位型空间光调制器, 像素数为 1920×1080 , 像素大小为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ 。 CCD (ML4022, FLI 公司, 美国) 的像素数为 2048×2048 , 像素大小为 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 。 O_1 与透镜 L_3 的间距为 124 mm, O_2 与 O_1 之间的距离为 Δz 。 SLM₂ 加载透镜的焦距为 3093 mm, 直径为 5.45 mm。 理论上对于 O_1 所在平面全息图的最佳记录位置 $z_h = 390$ mm, 系统截止频率为 124 lp/mm。

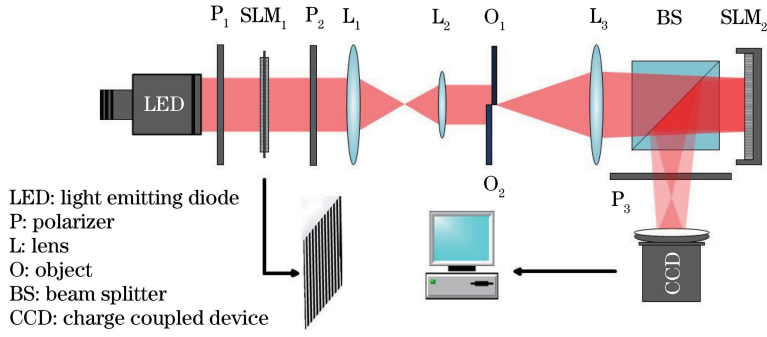


图 2 结构照明的 FINCH 实验光路示意图

Fig. 2 Experimental setup of FINCH with structured light illumination

依据文中阐述的结构光照明层析成像理论可知,当样品处于系统物空间某一深度处的薄的二维平面时,物体的复振幅透光率近似为 1,则层析像沿 z 向的强度分布可以表示为^[15]

$$I_{\text{sec}} = |H(2u, v)|, \quad (10)$$

式中: $H(u, v)$ 为系统的光学传递函数(OTF)的强度分布, $H(u, v) = P \otimes P^*$,其中的 P 为光瞳函数, $*$ 表示复共轭;参量 $u = 8(\pi/\lambda) \sin^2(\alpha z)$,其中的 z 为轴向离焦距离, α 为半孔径角, λ 为照明光波的中心波长; v 为结构光的归一化空间频率,与系统截止频率 f_c 的关系为 $v = k_0/f_c$,其中 k_0 为结构光的空间频率。所以在如图 2 所示的结构光照明 FINCH 成像系统中,层析重建所获得的重建像随离焦距离 z 的变化情况与该系统光学传递函数 OTF 沿 z 的变化情况相同。OTF 随离焦距离 z 的变化可以表示为^[16]

$$\text{OTF}(z, v) = 2(1 - 1.38v + 0.0304v^2 + 0.344v^3) \frac{J_1[4uv(1-v)]}{4uv(1-v)}, \quad (11)$$

式中: J_1 为一阶贝塞尔函数。

根据(11)式分析了归一化空间频率对系统层析成像特性的影响,给出了 $f_c = 124 \text{ lp/mm}$, $\lambda = 625 \text{ nm}$ 时,归一化空间频率分别为 0.2、0.5 和 0.9 以及未加载结构光的 FINCH 系统的轴向光学传递函数随离焦距离 z 的变化曲线,如图 3 所示。

由图 3 可以看出:在不同的归一化空间频率下,OTF 的半峰全宽对应的离焦距离不同,OTF 的半峰全宽越窄,层析效果越好;当结构光的归一化空间频率由 0.9 变化到 0.5 时,OTF 的半峰全宽减小;当归一化空间频率由 0.5 减小到 0.2 时,OTF 的半峰全宽增大。通过上述规律可以发现,存在一个最佳的归一化空间频率,使得光学系统的层析效果最好。也就是说,存在一个最佳的空间频率,使得层析效果最好。

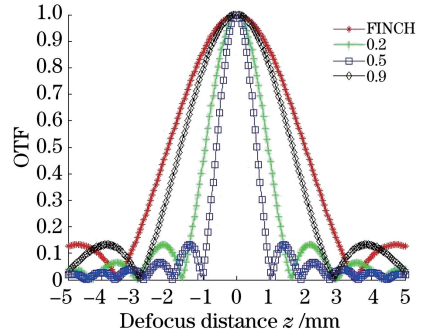


图 3 不同归一化空间频率下 OTF 随离焦距离的变化
Fig. 3 Relationship between OTF and defocus distance under different normalized spatial frequencies

为了验证这一理论分析,采用归一化的空间频率代替结构光的空间频率进行层析能力的研究。

3.2 结构光照明 FINCH 系统的成像特性

根据前面的理论分析,利用 MATLAB 研究了结构光归一化空间频率和物体不同深度平面的轴向间距对 FINCH 系统层析成像能力的影响。在 O_1 平面放置 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的分辨率板, O_2 平面放置为“SIDH”字母,两个物体沿 z 轴的距离 $\Delta z = 3 \text{ mm}$,照明光波长为 625 nm , SLM_1 加载竖直方向的余弦光栅,其共轭像面在 O_1 平面上。图 4 给出了结构光的归一化空间频率对 FINCH 系统层析重建像影响的数值仿真结果,图 4(a)~(d)分别是 SLM 上加载光栅归一化空间频率为 0、0.2、0.5 和 0.9 时产生的结构光照明 FINCH 的成像情形。图 5 给出了改变轴向距离 Δz ,且归一化空间频率为 0.5 时,结构光照明 FINCH 系统的层析成像。

研究表明,存在一个最佳的归一化空间频率,使得结构光照明 FINCH 系统的成像层析效果最好,即在得到 O_1 再现像的同时,很好地抑制了 O_2 的离焦信息。随着 O_2 到 O_1 的轴向距离增大,离焦像去除效果越来越好,即层析效果越来越明显。

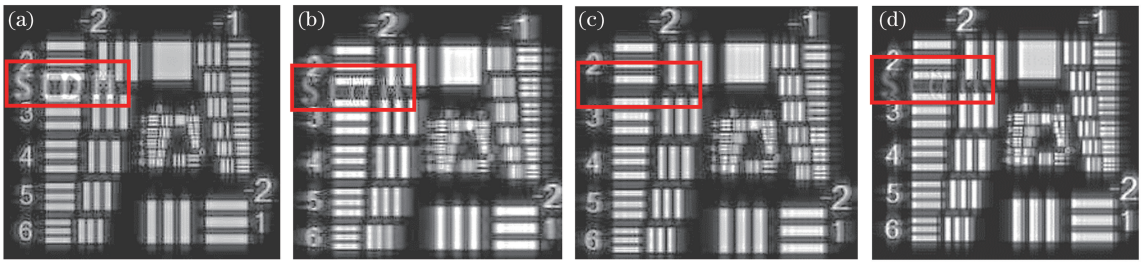


图 4 不同归一化空间频率结构光照明下基于 FINCH 系统的层析重建结果。(a) $\nu=0$; (b) $\nu=0.2$; (c) $\nu=0.5$; (d) $\nu=0.9$
 Fig. 4 Results of tomographic reconstruction based on FINCH system under structured light illumination with different normalized spatial frequencies. (a) $\nu=0$; (b) $\nu=0.2$; (c) $\nu=0.5$; (d) $\nu=0.9$

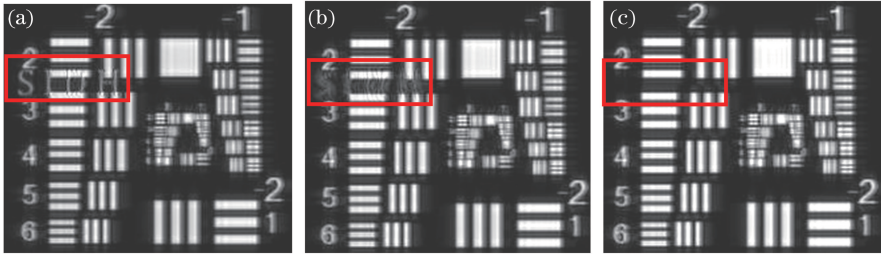


图 5 不同轴向距离下的层析成像结果。(a) $\Delta z=1$ mm; (b) $\Delta z=2$ mm; (c) $\Delta z=3$ mm
 Fig. 5 Results of tomographic imaging under different axial distances. (a) $\Delta z=1$ mm; (b) $\Delta z=2$ mm; (c) $\Delta z=3$ mm

根据图 2 的光路搭建实验系统,对结构光照明 FINCH 成像特性进行实验研究。物体为三行汉字,上面两行为 O_1 ,第三行为 O_2 , O_1 和 O_2 在物空间的初始轴向间距 $\Delta z=5$ mm,实验中针对 O_1 平面全息图的最佳记录位置 $z_h=397$ mm,SLM₁ 上加载不同周期的余弦光栅,光栅周期分别为 10,12,14,18,

24 lp/mm,其归一化空间频率分别为 0.24,0.27,0.33,0.42,0.54。不同归一化空间频率结构光照明下 FINCH 系统的光学层析再现像如图 6 所示。同时,为了在一定程度上定量说明再现像的质量,计算了图 6 中各情形下再现像的信噪比。再现像的信噪比随结构光归一化空间频率的变化如图 7 所示。

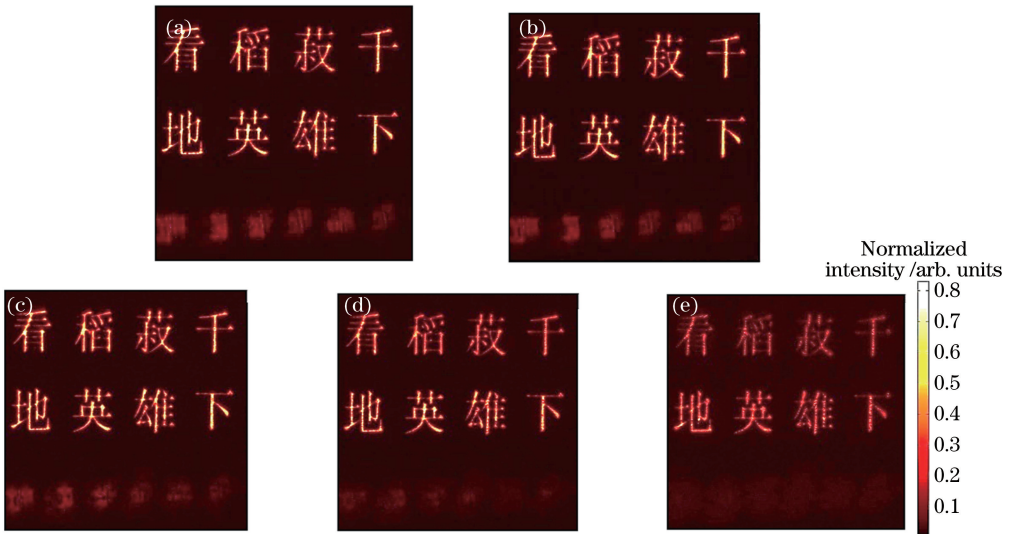


图 6 不同归一化空间频率结构光照明下基于 FINCH 系统的层析再现像实验结果。
 (a) $\nu=0.24$; (b) $\nu=0.27$; (c) $\nu=0.33$; (d) $\nu=0.42$; (e) $\nu=0.54$

Fig. 6 Experimental results of tomographic imaging and reconstruction based on FINCH system under structured light illumination with different normalized spatial frequencies. (a) $\nu=0.24$; (b) $\nu=0.27$; (c) $\nu=0.33$; (d) $\nu=0.42$; (e) $\nu=0.54$

结合图 6 和图 7 可以看出,结构光照明 FINCH 层析成像系统存在一个最佳的归一化空间频率,使

得光学层析的效果最好。为探究物体轴向距离对系统层析能力的影响,

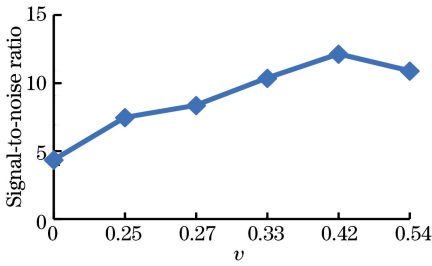


图 7 信噪比随结构光归一化空间频率的变化

Fig. 7 Relationship between signal-to-noise ratio and normalized spatial frequency of structured light

系统的 O_1 平面加载归一化空间频率为0.42的结构

光,当物体 O_1 到 O_2 的间距 Δz 分别为 3,4,5,6,7, 8 mm 时,分别记录物体的全息图,并对所记录的全息图进行传统的宽场再现(如图 8 所示)和层析再现(如图 9 所示)。图 9 中物体 O_1 再现像的信噪比示于图 10 中。由图 8 可以看出:传统宽场再现时,随 Δz 增加,物体 O_2 的再现像越来越模糊,其对物体 O_1 的影响逐渐减弱,但对物体 O_1 再现像的串扰仍然显著。由图 9 可以看出:随着 Δz 增加,物体 O_2 的再现像对物体 O_1 再现像的串扰得到了有效抑制,物体 O_1 的再现像的质量也得到提高(信噪比增加),表明系统层析成像能力得到了提升。

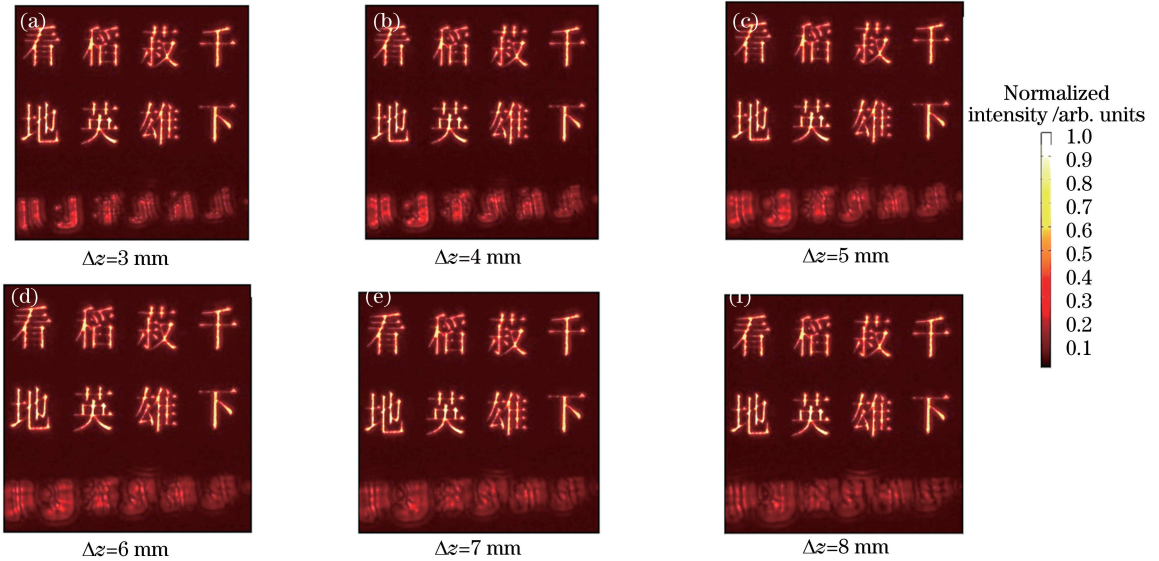


图 8 不同轴向距离下 FINCH 再现像的实验结果

Fig. 8 Experimental results of reconstructed images based on FINCH system under different axial distances

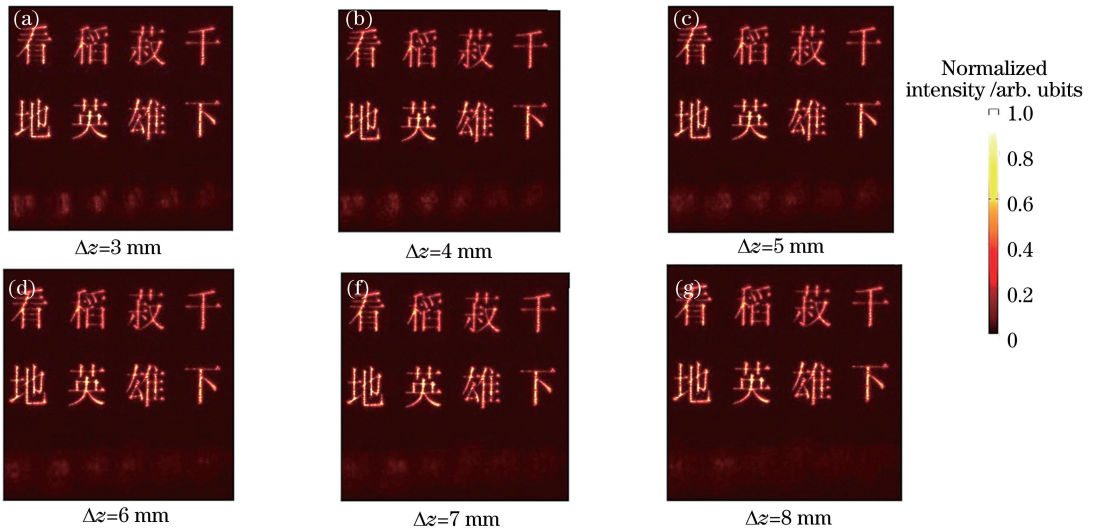


图 9 不同轴向距离下层析成像的实验结果

Fig. 9 Experimental results of tomographic imaging under different axial distances

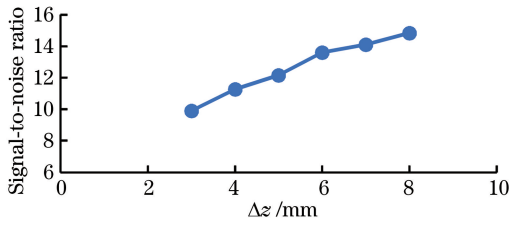


图 10 图 9 中再现像的信噪比

Fig. 10 Signal-to-noise ratio of reconstructed images in Fig. 9

4 结 论

提出了一种提高自干涉数字全息层析能力的方法。该方法采用二维结构光照明代替传统的均匀光照明,使系统的轴向分辨率得到了提高。研究了结构光的归一化空间频率和物体轴向距离对层析能力的影响。结果发现,系统存在一个最佳的结构光归一化空间频率,低于或高于该归一化空间频率的结构光照明系统都会降低系统的层析效果,并且在相同的归一化空间频率下,随着物体的轴向间距增大,离焦信息对焦平面信息的串扰减弱,并且结构光照明比传统宽场成像对再现像中离焦像的去除效果更好。通过模拟发现,加载的结构光空间频率达到系统截止频率的一半时,系统的层析能力最强。但是由于 SLM₁ 是像素化结构,加载的光栅只能是整数像素,所以实验中的部分空间频率不会恰好是最优的空间频率。在本研究中,只将结构光加载在物体的一个深度平面上,对于多个深度平面实现层析还需要进一步研究。该研究对于自干涉数字全息成像系统实现快速三维超分辨率成像奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Rosen J, Brooker G. Digital spatially incoherent Fresnel holography [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 912-914.
- [2] Siegel N, Lupashin V, Storrie B, *et al.* High-magnification super-resolution FINCH microscopy using birefringent crystal lens interferometers [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(12): 802-808.
- [3] Rosen J, Siegel N, Brooker G. Theoretical and experimental demonstration of resolution beyond the Rayleigh limit by FINCH fluorescence microscopic imaging [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26249-26268.

- [4] Rosen J, Brooker G. Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(3): 190-195.
- [5] Kim M K. Full color natural light holographic camera [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9636-9642.
- [6] Kim M K. Adaptive optics by incoherent digital holography [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2694-2696.
- [7] Peters P J. Incoherent holograms with mercury light source [J]. *Applied Physics Letters*, 1966, 8(8): 209-210.
- [8] Worthington H R. Production of holograms with incoherent illumination [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(10): 1397-1398.
- [9] Marathay A S. Noncoherent-object hologram: its reconstruction and optical processing [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(10): 1861-1868.
- [10] Rosen J, Kelner R. Modified Lagrange invariants and their role in determining transverse and axial imaging resolutions of self-interference incoherent holographic systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 29048-29066.
- [11] Kelner R, Katz B, Rosen J. Optical sectioning using a digital Fresnel incoherent-holography-based confocal imaging system [J]. *Optica*, 2014, 1(2): 70-74.
- [12] Siegel N, Brooker G. Improved axial resolution of FINCH fluorescence microscopy when combined with spinning disk confocal microscopy [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22298-22307.
- [13] 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]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): F91-F96.
- [14] Kashter Y, Vijayakumar A, Miyamoto Y, *et al.* Enhanced super resolution using Fresnel incoherent correlation holography with structured illumination [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1558-1561.
- [15] Neil M A A, Juškaitis R, Wilson T. Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(24): 1905-1907.
- [16] Dan D, Yao B L, Lei M. Structured illumination microscopy for super-resolution and optical sectioning [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(12): 1291-1307.