

非相干全息术成像特性及研究进展

万玉红^{1,2} 满天龙^{1,2} 陶世荃^{1,2}

(¹ 北京工业大学微纳信息光子技术研究所, 北京 100124)
² 北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

摘要 非相干光照明的物体或者自发光物体可以认为是由无数多个点源构成,任意两点发出的光波之间不具有相干性,但同一物点发出的光被分束后是空间自相干的。非相干全息术通过某种光学技术将来源于非相干物体上同一点的光波分为两束,由于这两束光是空间自相干的,因而两束光可以干涉实现点源全息图的记录,所有点源全息图的非相干叠加构成物体的全息图。对全息图进行光学或数值重建可以恢复原始物体的三维信息。近年来,非相干全息术已经在非扫描荧光显微成像、非相干彩色全息显示和自适应光学领域展示了其应用的潜力。阐明了非相干全息术记录和再现的基本原理,介绍了记录非相干数字全息图的系统与方法,重点分析和讨论了基于自参考光的同轴数字全息成像系统的成像特性、应用的优势和局限,并介绍了这些方面的研究进展。

关键词 全息;非相干全息;三维成像;分辨率

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209004

Imaging Characteristics and Research Progress of Incoherent Holography

Wan Yuhong^{1,2} Man Tianlong^{1,2} Tao Shiquan^{1,2}

(¹ *Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)
² *College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

Abstract Incoherently illuminated or self-luminous objects are composed of many independent object points. Any two points from the object are spatially incoherent whereas the two beams from the same object point are spatially coherent. Incoherent digital holography is a technology of recording holograms of incoherent objects and reconstructing three-dimensional information of the original object. The hologram of a point object can be formed based on spatial self-coherence of the beams by suitable optical beam-splitting technique and the hologram of an extended object is the superimposing of all point-holograms incoherently. The investigations on incoherent digital holography have verified that this technique has great potential in non-scanning fluorescent microscopy, incoherent color holography, and incoherent adaptive optics. The basic principle of incoherent digital holography is firstly demonstrated and some typical incoherent holographic imaging systems are summarized. The key imaging characteristics and research progress are analyzed and discussed based on self-reference incoherent holography.

Key words holography; incoherent holography; three-dimensional imaging; imaging resolution

OCIS codes 090.1995; 070.2025; 210.4770; 110.6880; 100.6640

1 引 言

全息术^[1]最初被设想为一种相干成像技术,只有在相干光照明、来源于任意两物点的光是空间互

相干的情形下,才能记录物体的全息图。Rogers^[2]发现点源全息图可以认为是复杂形式的菲涅耳波带片(FZP)。Mertz 等^[3]提出了非相干全息术的思

收稿日期: 2013-11-19; **收到修改稿日期**: 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(61107002)、北京市教委科研计划面上项目(km201410005032)、北京工业大学基础研究基金(X4006111201301)

作者简介: 万玉红(1976—),女,博士,副教授,主要从事数字全息与三维成像、体全息技术及其应用等方面的研究。

E-mail: yhongw@bjut.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

想,即在非相干光照明物体的情形下,利用一个菲涅耳波带片做编码孔,构成物体的所有点通过这个编码孔在记录平面内投影后直接叠加,就形成了记录物体强度(振幅)信息和位置(相位)信息的全息图,再通过适当的解码方式就可以通过全息图重建过程将原始物体的强度和位置信息再现出来。在非相干全息术中,任意两物点之间的空间相干性不再是全息记录的必要条件。

Mertz 等的理论局限性在于没有考虑光的波动本质和干涉衍射特性。Lohmann^[4]、Stroke 等^[5]以及 Cochran^[6]随后发展了非相干全息术的理论,考虑光的干涉和衍射,利用点源全息图非相干叠加的原理来解释采用空间非相干光的全息术。非相干光源照明的物体或者自发光物体上的任意一点发出的光波具有空间自相干性,经过某种光学技术将来自于同一物点的光分为两部分后干涉可以实现点源全息图的记录。因为参考光波与物光波是来源于同一物点,所以也称为自参考光。全息图记录过程中,每一点源产生一个二维(2D)干涉图样的强度分布,将每一物点的位置和强度信息以某种独特的方式编码于全息图,每一物点的横向位置信息(x, y)通过对应条纹图样的中心位置体现,物体的深度位置信息可以编码于条纹的疏密。因为编码方式是独特的,所以不会出现两个物点产生相同条纹的情况,全息图也就可以再现得到原始物体的三维(3D)信息。在非相干全息术中为了得到对比度足够好的干涉条纹,还需要保证光源具有一定的单色性(即时间相干性)。否则,各个波长光波产生的干涉图像将会互相串扰,使得全息图的对比度下降,进而降低再现像的质量。

对非相干全息术的研究初期主要集中于分波方法和非相干全息成像涉及的基本问题(如偏置、噪声等)^[4-12]。Lohmann^[4]概括给出了多种分波方法,包括采用双焦距透镜的分振幅法、迈克耳孙干涉仪分振幅法、马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪分振幅法、衍射分波、双孔径的分波前方法等。Cochran^[6]提出了利用三角干涉光路进行分波实现全息图记录的方法。光源发出的光波经分束棱镜分束后,两束光分别沿具有不同放大倍率的顺时针和逆时针方向在光路中传播,再经由分束棱镜合束后进行干涉,并将干涉条纹记录下来。Kim 等^[13-17]对三角全息术的系统优化、成像分辨率、相移误差等基本问题进行了研究。Leith 等^[7]分析了一种利用消色差条纹系统记录全息图的情形,即采用衍射光栅分束,在光栅的像平面上实现全息图的记录。也有研究人员提出了利

用菲涅耳波带片消色差条纹干涉系统实现非相干光照明样品的傅里叶变换全息图的记录^[8]。

近年来随着电荷耦合器件(CCD)和空间光调制器(SLM)在全息术中的应用,促成了数字全息术的发展^[18-21],也发展出了多种记录非相干数字全息图的方法^[22-27]。Poon 等^[22-23]利用菲涅耳波带片和物体间的相关提出了扫描全息术,并将该技术与荧光显微成像相结合,首次实现了荧光全息图的记录。扫描全息显微术在近几年的研究中取得了一系列的进展,其横向分辨率可以达到 $1 \mu\text{m}$ ^[28-29]。2007 年 Rosen 等^[24]提出了基于 SLM 衍射分光的菲涅耳非相干关联全息术(FINCH),实现了非相干全息图的记录,再通过计算菲涅耳变换(卷积)的方法重构原始物体的三维信息。该技术将物点的深度信息通过菲涅耳波带片的条纹密度来体现,横向信息通过条纹图样的横向位置直接体现,在不使用任何的扫描装置和移动部件的条件下即可获取样品的三维信息。该技术已经在彩色物体识别、荧光生物样品显微成像和高分辨率的合成孔径成像等方面显示了其应用潜力^[30-32]。

与采用激光光源的全息术比较,非相干全息术使用空间非相干光来照明物体实现全息图的记录,且记录过程中不会产生类似于激光全息术中固有的相干散斑噪声,所以可以有更高的再现像质量。另一方面,激光全息术中每一物点的光与参考光中所有点干涉,而非相干全息术利用与物光同源的自参考光与物光干涉实现全息图的记录,来源于同一物点的物光和参考光只是整体光波中很小的一部分,所以点源干涉条纹的强度很弱,并且具有一定的曝光偏置量。当物点增多时,所有点源全息图非相干叠加会使形成的全息图质量降低,从而得不到良好的再现像。这也是非相干全息术应用的局限。基于自参考光的非相干全息术近年来得到了广泛的关注和研究^[33-49],为全息术现代发展的研究前沿。本文主要针对采用自参考光的 FINCH 技术和三角全息技术,分析讨论非相干全息术的成像分辨率、再现像质量、应用潜力以及在这些方面的研究进展。

2 非相干全息术的基本原理

非相干全息术的基本原理从本质上来说是利用某种独特的方式将每一物点的三维位置信息和强度信息编码于全息图。菲涅耳波带片是一种广泛采用的编码方式。图 1 为基于菲涅耳波带片的非相干全息图形成原理。图 1(a)为 Mertz 等最早提出的方

法,不考虑光波的波动本质及其衍射效应,将全息图认为是一系列波带片投影的非相干叠加。这一理论只有严格保证投影距离 Z_p ,使记录平面位于菲涅耳波带片的投影区,才是合理的。图 1(b)为点源全息图随着非相干全息术的发展,考虑了光波的波动本质,利用适当分束方法实现点源全息图的记录,每个

点源全息图是由来源于同一物点的光波被分为两束后干涉获得的,全息图具有菲涅耳波带片的结构。图 1(b)中衍射分光元件与记录平面之间的距离 Z_i 需保证记录平面处在物光场的菲涅耳衍射区。下文中的非相干全息术特指考虑了光的干涉和衍射特性的成像技术。

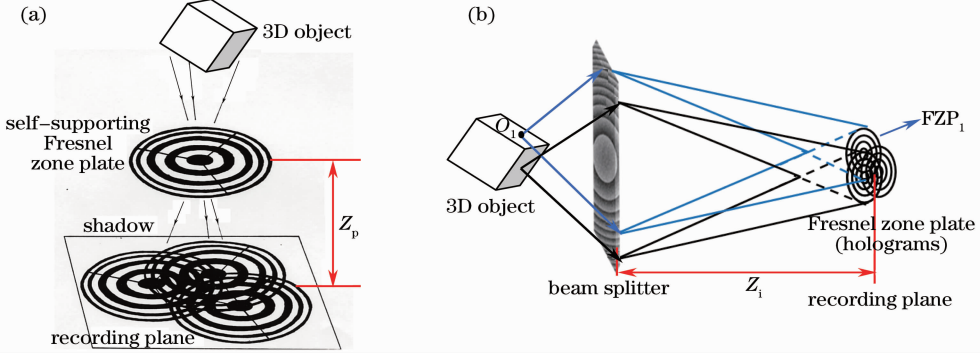


图 1 非相干全息术原理示意图。(a) FZP 投影叠加;(b) 点源全息图叠加

Fig. 1 Schematic illustration of incoherent holography. (a) Superimposing of FZP projections; (b) superimposing of FZP holograms

如图 1(b)所示,考虑物体上空间位置为 (x, y, z_1) 的一个物点 O_1 ,记录平面 (x_c, y_c) 上得到的全息图具有与 FZP 类似的形式,其强度分布为

$$I(x_c, y_c; z_1) = C^2 + C^2 \cos[\phi(x_c - x, y_c - y; z_1)] = C^2 + \frac{1}{2}C^2 \exp[i\phi(x_c - x, y_c - y; z_1)] + \frac{1}{2}C^2 \exp[-i\phi(x_c - x, y_c - y; z_1)], \quad (1)$$

式中 C^2 为一个含有物点强度信息的常量, $\phi(x_c - x, y_c - y; z_1) = \pi[(x_c - x)^2 + (y_c - y)^2]/(z_1\lambda)$ 是编码了物点深度信息以及横向位置信息的二次相位因子。单点的全息图可以作为非相干数字全息系统记录过程的点扩展函数(PSF, 又称脉冲响应)。对于非相干照明的一个连续分布的三维物体,若物光场分布为 $g(x, y, z)$, 则物体的全息图为所有点源全息图的非相干叠加,即可以表示为物光场的分布与点源全息图的卷积积分:

$$H(x_c, y_c) = C^2 \iiint g(x, y, z) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \exp[i\phi(x_c - x, y_c - y, z)] + \frac{1}{2} \exp[-i\phi(x_c - x, y_c - y, z)] \right\} dx dy dz. \quad (2)$$

图像探测器件记录下来的是一个二维的强度场分布 $H(x_c, y_c)$ 。理论上,可以通过计算 $H(x_c, y_c)$ 的菲涅耳衍射积分实现物信息的三维再现。

非相干全息术一般采用空间非相干的准单色光照明,物点发出的光波与其自参考光之间是空间自相干的,但是它们之间的时间相干性却受到准单色光源的限制。为了充分利用光源的时间相干性和图像探测器件的空间带宽,非相干全息术通常采用同轴的光路配置,图 2 给出了几种典型的光路配置。图 2(a)和(b)分别为基于三角干涉仪和基于 FINCH 技术的物参光共路同轴的实验光路,这类光

路配置可以认为是单通道的几何配置。图 2(c)和(d)为基于迈克耳孙干涉仪和马赫-曾德尔干涉仪实现非相干全息图记录的光路。同轴的光路配置引入的问题是再现像中零级项和共轭像对再现出的原始物信息的干扰。所以上述实验设置有一个共同点,即结合了相移技术。图 2 中的波片(WP), SLM, 压电陶瓷(PZT)平移台均是为了在参考光中引入一定的相移,对同一物体实现多幅相移全息图的记录,多幅相移图叠加得到复值全息图。以三步定步长相移数字全息为例,带有相移角 $\theta_i (i=1, 2, 3)$ 的单幅全息的形式可表示为

$$H_i(x_c, y_c) = C^2 \iiint g(x, y, z) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \exp[i\phi(x_c - x, y_c - y, z) + i\theta_i] + \frac{1}{2} \exp[-i\phi(x_c - x, y_c - y, z) - i\theta_i] \right\} dx dy dz, \quad (3)$$

式中 H_i 代表记录的第 i 个带有相移角 θ_i 的全息图,由三幅相移全息图叠加得到的复值全息图可以表示为

$$H_F(x_c, y_c) = H_1(x_c, y_c)[\exp(\pm i\theta_3) - \exp(\pm i\theta_2)] + H_2(x_c, y_c)[\exp(\pm i\theta_1) - \exp(\pm i\theta_3)] + H_3(x_c, y_c)[\exp(\pm i\theta_2) - \exp(\pm i\theta_1)] = C^2 \iiint g(x, y, z) \{ \exp[i\phi(x - x_c, y - y_c, z)] \} dx dy dz. \quad (4)$$

与(2)式相比可知,(4)式所示的复值全息图中去掉了(2)式中的后一个复指数函数项(代表孪生像)和一个常数项(代表直流项)的影响。计算该复值全息图与菲涅耳变换核的卷积可以再现出原始物的信息,通过改变菲涅耳变换核中的再现距离 z_r 可以再现不同深度的物信息。某一再现距离 z_r 处的物体

再现像 $g'(x', y')$ 可以表示为

$$g'(x', y') = H_F(x_c, y_c) * \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x')^2 + (y')^2]\right\}, \quad (5)$$

式中 $*$ 代表二维卷积。

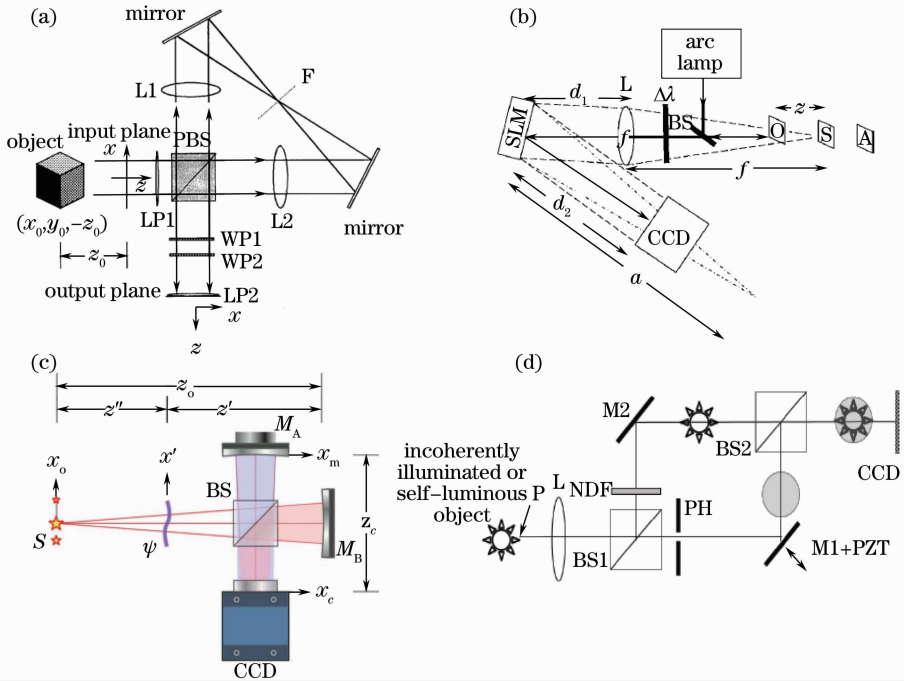


图 2 典型非相干全息术实验光路示意图。(a) 改进的三角全息干涉光路;(b) FINCH 光路;
(c) 改进的迈克尔孙干涉仪光路;(d) 马赫-曾德尔干涉光路

Fig. 2 Typical experimental optical set up of incoherent holography. (a) Modified triangular interferometer; (b) FINCH;
(c) modified Michelson interferometer; (d) M-Z interferometer

从非相干全息术的基本原理可知,对于单一物点来说全息图的记录过程是一个空间自相干、时间部分相干的过程,而扩展物体的全息图是无穷多个点源全息图的非相干叠加。非相干全息图本质上是记录了物体的强度信息和三维位置信息。全息图再现可以采用光学的方法,也可以采用数值算法。这里给出了数值再现的过程,通过计算复值全息图的菲涅耳衍射传播得到原始物体的再现像,属于相干再现的过程。非相干数字全息术是一种结合了相干与非相干过程的混合成像系统,这一特点使其具有一些特殊的性质,从而在一些特殊领域拥有较大的应用潜力。

3 非相干全息术成像特性及研究进展

针对非相干全息术成像的研究一直聚焦于抑制全息图记录过程中偏置量和共轭像、提高成像分辨率和重建像的质量以及探索该技术的应用潜力等方面。

3.1 提高成像分辨率的研究

对非相干数字全息术的分辨率问题的研究是推进该技术发展的一个重要方面。Kim 等^[14]研究了非相干三角全息术的分辨率问题。将轴上单点形成的全息图作为记录过程的点扩展函数,采用瑞利判据分析两个点的分辨率。研究表明,全息图尺寸 R 、照明光波长 λ 、放大倍率 α 决定了系统的成像

分辨率^[14]。图 3、4 为 Kim 等给出的理论分析结果，至今尚无实验结果报道。数值仿真过程中作为不变量时用到的记录光波长 λ 为 632.8nm，全息图的半径 R 为 5 mm，放大倍率 α 为 0.6。研究表明，非相干三角全息成像系统的横向和轴向分辨率随着系统放大倍率的增加、全息图尺寸的增加而提高，随

着照明光波长的增加而降低。值得注意的是，如果系统的放大倍率为 1，在记录平面上沿顺时针和逆时针方向传播的两束光具有相同的放大倍率且传播方向相同，此时没有干涉过程产生全息图，作为全息成像系统的再现像分辨率为零。

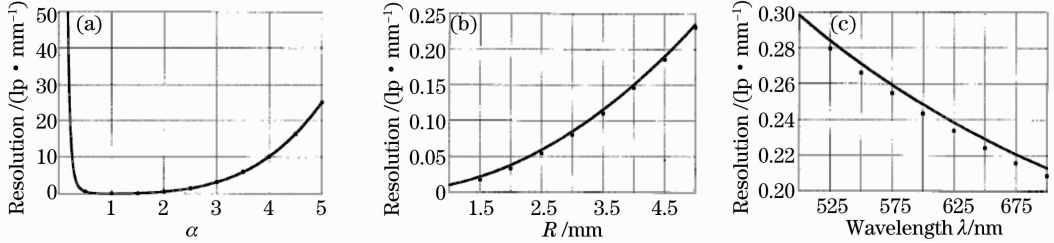


图 3 三角全息成像纵向分辨率特性。(a) 随系统放大倍率的变化；(b) 随全息图尺寸的变化；(c) 随记录光波长的变化

Fig. 3 Longitudinal resolution characteristics of triangular holography. (a) Resolution versus magnification factor;

(b) resolution versus radius of hologram; (c) resolution versus recording wavelength

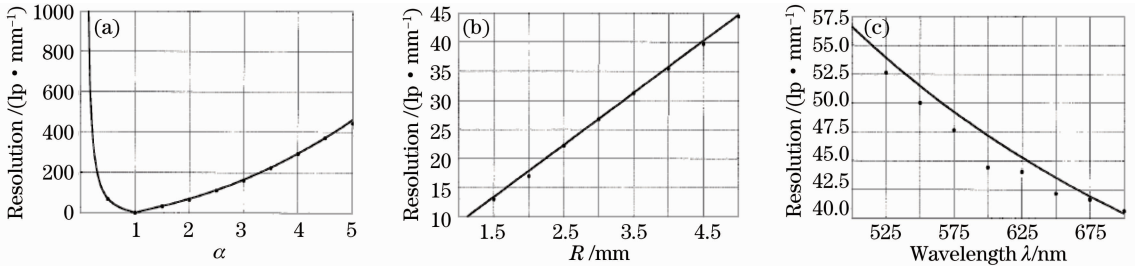


图 4 三角全息成像横向分辨率特性。(a) 随系统放大倍率的变化；(b) 随全息图尺寸的变化；(c) 随记录光波长的变化

Fig. 4 Lateral resolution characteristics of triangular holography. (a) Resolution versus magnification factor;

(b) resolution versus radius of hologram; (c) resolution versus recording wavelength

基于 FINCH 原理的非相干数字全息成像系统的分辨率得到了较多的研究。Brooker 等^[33]提出了利用 SLM 对入射光偏振敏感的特性，将偏振片与 SLM 结合使用，对偏振方向与空间光调制器敏感方向一致的光进行球面波相位的调制，对偏振方向与空间光调制器敏感方向垂直的光直接反射，使同一个像素上既有平面波又有球面波，这样可以最大程度地利用空间光调制器的空间带宽积。图 5 所示为不采用和采用偏振片情形下的实验结果。通过对比可知，通过偏振片与 SLM 结合的方法，系统的成像分辨率得到了显著的提高。他们还研究了 SLM 上加载双透镜的相位衍射模式情形下，不同加载方式对成像分辨率的影响。研究表明，SLM 上利用像素的随机分布实现分束的模式，并且加载的两个透镜的焦距差距 Δf 较小时系统成像分辨率最好^[34]，如图 6 所示。按照线性系统理论分析 FINCH 的成像特性并且对影响系统成像质量的各因素进行研究后，他们认为 FINCH 应该作为相干过程与非相干过程混合的成像系统，其调制传递函

数(MTF)具有相干成像系统的特性，但是在优化的条件下，其空间带宽等于非相干系统的情形^[35]。FINCH 系统 PSF 的半峰全宽取决于光路配置和 SLM 与 CCD 之间距离与衍射透镜焦距之比，当 SLM 与 CCD 之间的距离可以使参与干涉的两束光波完全重合时系统实现最优的成像分辨率。在优化条件下，FINCH 的成像分辨率比传统的非相干成像系统提高了 1.5 倍，比相干成像系统的分辨率提高

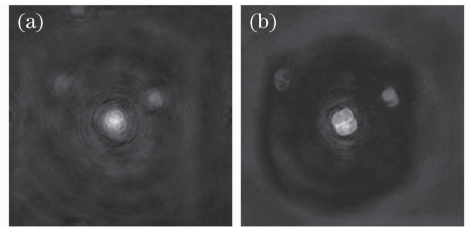


图 5 FINCH 技术实现的荧光花粉颗粒的再现像。

(a) SLM 未与偏振片结合；(b) SLM 与偏振片结合

Fig. 5 Reconstructed images from holograms of a pollen grain test slide. (a) Without and (b) with polarizers combining with SLM

了 2 倍。图 7 给出了 FINCH 成像系统与标准显微镜成像系统的成像情况比较。图 7(a) 为显微镜对美国空军(USAF)分辨率板成像情况,图 7(b) 为对图 7(a) 中的第 8 组和 9 组放大显示,图 7(c) 为基于

相同放大倍率的 FINCH 系统得到的全息图的再现像,可以看出其成像分辨率优于标准显微镜成像系统。

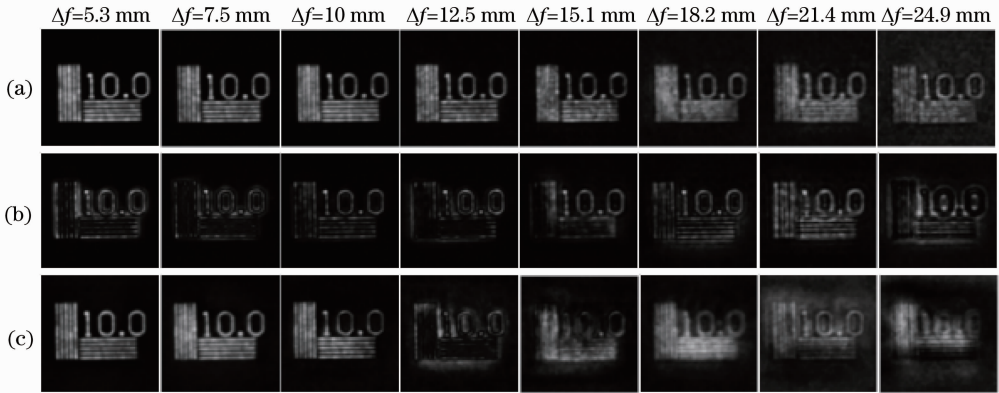


图 6 SLM 上相位加载模式对 FINCH 技术再现像的影响($\Delta f=5.3\sim 24.9$ mm)。(a) SLM 掩模为随机像素加载; (b) 像素求和加载; (c) 随机圆形加载

Fig. 6 Best in-focus reconstructed images from holograms captured with different methods ($\Delta f=5.3\sim 24.9$ mm). (a) Random pixel method; (b) phase sum method; (c) random ring method

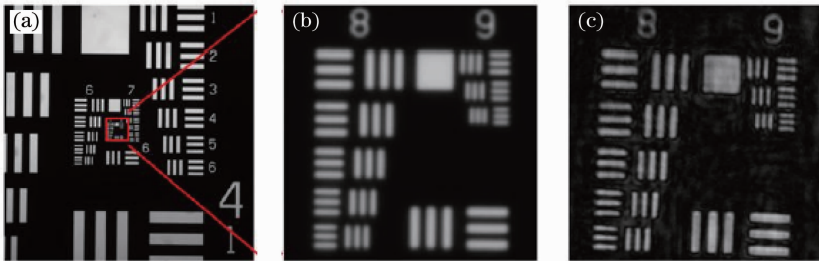


图 7 分辨率板的显微镜成像与 FINCH 成像比较。(a) 标准显微成像; (b) (a) 中第 8 组和 9 组放大显示; (c) FINCH 显微成像

Fig. 7 Imaging comparison of USAF resolution board from standard microscope and FINCH. (a) Standard microscope image; (b) zoomed in results of group 8 and 9 from Fig. (a); (c) digitally linear reconstruction of FINCH hologram

Bouchal 等^[36]建立了 FINCH 系统成像的波动模型,给出了三维点扩展函数的特性并且通过对两个物点成像研究了系统中 Δ_2/f_d (Δ_2 为 SLM 与 CCD 之间的距离, f_d 为 SLM 上加载的透镜焦距) 对成像分辨率的影响,给出了理论分析和实验验证结果。Tone 等^[37]针对光源直径对非相干数字全息图轴向分辨率的影响进行了简单的分析,给出了少量的理论模拟结果,但并没有通过实际的实验进行验证。为了实现超分辨率非相干数字全息成像, Katz 等^[32]将合成孔径的相关理论应用到含有 SLM 的全息成像系统中,使系统的分辨率超过了瑞利分辨极限。Hong 等^[38]提出了采用超分辨率图像重建技术来增强非相干数字全息术的成像分辨率。

综合分析目前关于非相干数字全息成像系统分辨率的研究可知,对于优化全息图记录方法和在具

体光路配置中增强系统的分辨率研究得较多,讨论了记录距离、参与干涉的光波曲率半径等参数对全息图记录和再现的影响,但是研究过程中各参数的变化互相牵制,使分析方法略显繁琐,实验结果具有局限性。非相干数字全息成像系统的全息图具有菲涅耳波带片的结构,系统参数的变化通常会引起所记录的全息图尺寸 R_{eff} 和全息图焦距 f_h 的同时变化,所以引入全息图有效数值孔径的概念,研究各参数对全息图数值孔径和再现像分辨率的影响是更加便捷和合理的一种方法^[39]。非相干数字全息成像系统的分辨率还会受到照明光源特性、物体结构等因素的影响,关于这一方面的研究尚需进一步开展。

3.2 关于改善成像质量的研究

非相干全息术成像的本质是利用了多个菲涅耳波带片全息图非相干叠加的原理,因此当记录物体变

复杂时,重建像中的直流偏置量也随之增加,从而影响成像质量。共轭像也是影响重建像质量的一个重要因素。抑制直流偏置和共轭像是提高非相干数字全息术成像质量的重要任务。Kozma 等^[11]提出了一种调制的方法,从偏置中分离出空间变化的部分。在干涉仪的一臂光路中加入窄带时域调制,空间变化的部分再被时间频率调制,而直流偏置不被调制,从而可以将两项分开。三角全息术也得到了发展,

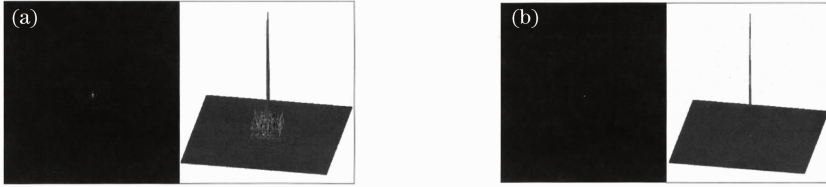


图 8 三角全息中点源再现像和强度分布。(a) 未去除直流偏置和共轭像；(b) 去除直流偏置和共轭像

Fig. 8 Image reconstructed numerically and its intensity profile of a hologram from triangular interferometer.

(a) With bias and twin images; (b) without bias and twin images

Lai 等^[42]提出了在像面附近记录非相干数字全息图提高再现像信噪比的方法,通过分析 FINCH 系统中参与干涉的两束光光程差(OPD)与全息图记录距离的关系,证实了记录像面全息图可以兼顾物光的强度和全息图的对比度,从而使再现像具有较高的亮度和信噪比,理论计算和实验结果分别如图 9 和图 10 所示。图 9 是两种不同光路配置下参与干涉的两束光波之间的最大光程差随 CCD 记录位置的变化关系。图 9 中 f_1, f_2 为空间光调制器上加载的两个透镜的曲率半径,黑色虚线表示光源的相干长度 l_c ($l_c = 11.4 \mu\text{m}$),蓝色线为一束平面波和一束球面波在记录平面产生的光程差情形 ($f_1 = 323 \text{ mm}, f_2 = \infty$),红色线为两束球面波在记录平面产生的光程差情形 ($f_1 = 323 \text{ mm}, f_2 = 226 \text{ mm}$)。图中标示出的 #1 和 #2 情形中 CCD 的记录位置相同,但由于光路配置不同,所以最大光程差不同。

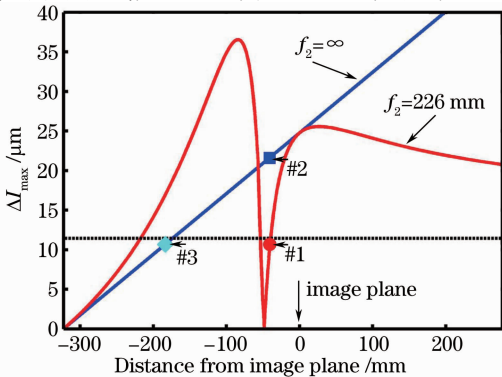


图 9 两光束最大光程差 ΔI_{max} 随 CCD 记录距离变化曲线

Fig. 9 Maximum OPD variation with the distance of CCD from image plane

在系统中插入偏振片、波片和偏振分束棱镜的组合,产生相移全息图,可达到抑制直流偏置和共轭像的目的^[13]。图 8 给出了三角全息术中点源全息图再现像移除直流项和共轭像前后的再现结果。随着相移数字全息术的提出,在非相干全息术中引入相移技术,可以很好地抑制直流项与共轭像对再现原始像的影响^[24]。通过增加记录的相移全息图的数量也可以有效提高再现像的质量^[40-41]。

#1 和 #3 情形的最大光程差相同,但由于光路配置不同,所以 CCD 的记录位置不同。在 #1, #2 和 #3 情形下记录直径为 510 nm 的荧光粒子的全息图,其再现像如图 10 所示,图 10(a) 为再现像相位分布,图 10(b) 为强度像,图 10(c) 为再现像的强度分布曲线。实验结果表明,在像面附近记录得到的再现像具有较好的信噪比。

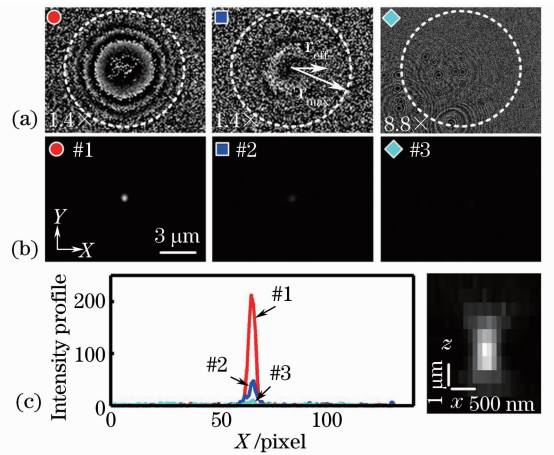


图 10 510 nm 荧光颗粒的非相干全息图不同情形下再现像比较及强度曲线。(a) 相位分布；(b) 强度像；(c) 强度曲线

Fig. 10 Comparison of the decoded phase, reconstructed intensity images and intensity profile of 510 nm diameter fluorescence bead. (a) Decoded phase; (b) reconstructed intensity image; (c) intensity profile

利用 2D 的 Hamming 窗口函数限制重建过程中菲涅耳衍射的脉冲响应边界,可以在重建距离较短时有效提高再现像的质量,并且不损失系统的横

向和纵向分辨率^[43]。图 11 给出了分别采用圆形窗口函数以及二维 Hamming 窗口函数时得到的荧光花粉颗粒的再现像。重建过程中,共再现了不同深度的 100 幅切片像,图中显示的是第 39 幅、第 46 幅

和第 67 幅的结果。由图 11 可知,采用二维 Hamming 窗口函数时,可以有效抑制再现像中物体边缘处的强度震荡,提高再现像的质量。

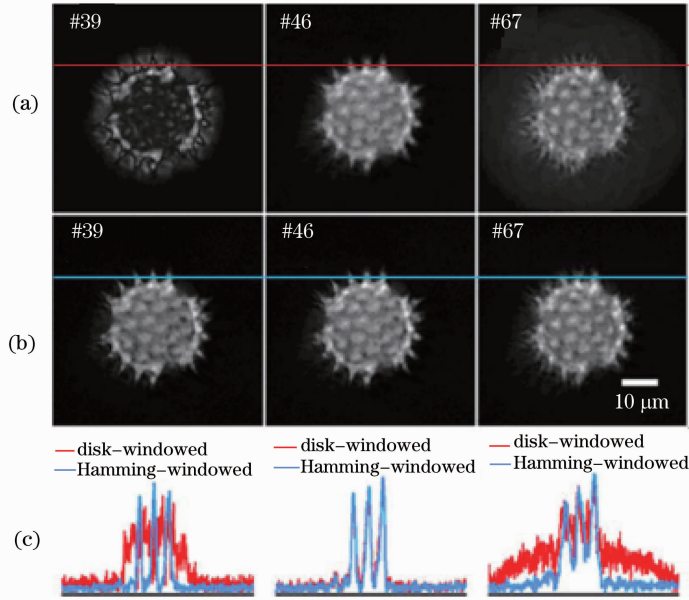


图 11 较短重建距离下采用圆形窗口和采用 Hamming 窗口的 PSF_H 的花粉颗粒的重建像及强度分布。
(a) 采用圆形窗口的 PSF_H ; (b) 采用 Hamming 窗口的 PSF_H ; (c) 强度分布

Fig. 11 Reconstructed images of pollen grains from holograms captured with short reconstruction distance.
(a) With disk-windowed PSF_H ; (b) with Hamming-windowed PSF_H ; (c) intensity distribution

非相干数字全息术由于结合了相移技术,可以很好地抑制再现过程中的直流项和共轭像的影响。但是任何相移器件受其自身特性或者使用条件的影响,都会产生相移误差,相移误差的存在会降低再现像的质量。从目前的研究来看,关于相移误差对非相干全息术成像质量的影响尚未有研究,而这一问题值得关注和深入研究。另一方面非相干全息术本质上得到的是一个非相干全息图,采用相干再现和非相干再现得到的再现像特性的区别也有待进一步研究。同时对于三维物体,从非相干全息图再现出来不同深度的物体信息具有不同的横向放大倍率,如果想高保真度地重构原始物体的三维像,也需要在算法上进行完善。

3.3 非相干数字全息术应用研究

从上述对非相干数字全息术的研究可以看出,该技术具有高分辨率、低噪声、非扫描、成像速度快等特性,使其在彩色三维显示^[30]、荧光三维显微成像^[31]、天文学成像^[47-48]、光场的相干性测量^[49]等领域具有独特的应有优势和应用潜力。

Rosen 等^[30]的研究表明,菲涅耳非相干数字全

息术能够记录荧光物体的多色数字全息图。图 12 为荧光非相干彩色全息图记录的原理性实验光路。弧光灯发出的光经滤波片 F_1 滤波后照明涂有荧光染料的三维物体(骰子)。在受到照明后物体上各种荧光染料受到激发而发射不同波长的荧光。从骰子发出的光利用不同中心波长的滤波器 F_2 滤波后,经 SLM 反射、分束,两束光在单色数字相机 CCD 表面

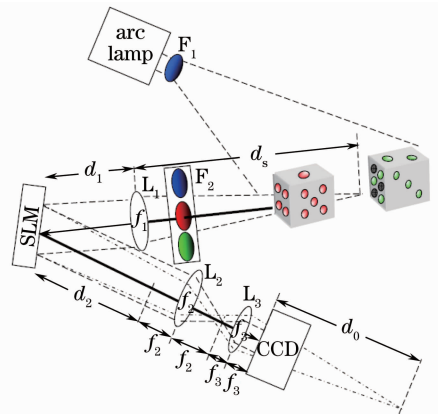


图 12 非相干数字全息记录系统示意图
Fig. 12 Schematic of an incoherent digital hologram recorder

干涉并被记录在 3 张全息图中,3 张图分别具有不同的相位因子。在计算机中将 3 张全息图进行叠加,在排除孪生像干扰的条件下,建立该荧光波长的复值菲涅耳全息图。各个波长荧光的全息图在计算机中经过进一步合成,得到多波长荧光全息图和三维彩色图像,实验结果如图 13 所示。图 13(a),(b)分别为骰子菲涅耳复值全息图的振幅和相位;图 13(b),(d)分别为骰子在红色和绿色点面位置的非荧

光全息图的数值重建像;图 13(e),(f)分别为红色点面的复制全息图振幅和相位;图 13(g),(h)分别为骰子红色和绿色点面位置的红色荧光全息图的重建像;图 13(i),(j)分别为绿色点面的复制全息图振幅和相位;图 13(k),(l)分别为骰子红色和绿色点面位置的绿色荧光全息图重建像;图 13(c),(g),(k)组合后的结果示于图 13(m),图 13(d),(h),(l)组合后的结果示于图 13(n)。

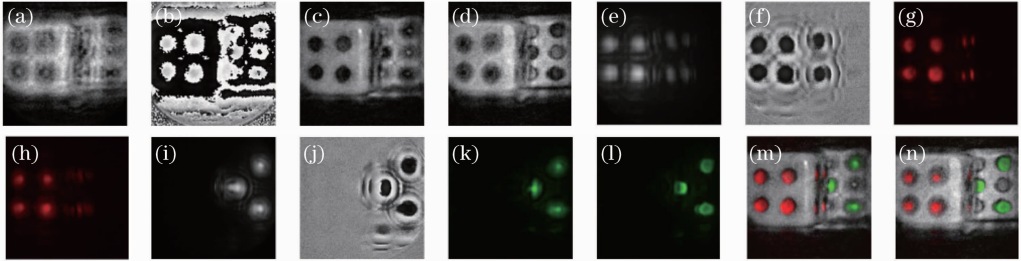


图 13 基于 FINCH 技术的荧光物体的非相干全息图及在不同情形下的再现像

Fig. 13 Fresnel incoherent correlation holograms of a fluorescent object and the reconstructed images at different depths

2008 年,基于 FINCH 技术发展了非扫描的荧光显微镜成像系统(FINCHSCOPE)^[31],并将其用于荧光生物样本的三维成像。通过使用高数值孔径的透镜、SLM、CCD 相机以及一些简单的滤光片,FINCHSCOPE 无需进行扫描即可再现三维显微图像。图 14 所示为 FINCHSCOPE 系统的光路图,图 15 为在该系统中实现的多色荧光微珠(尺寸为 6 μm)的全息图记录与再现结果。图 15(a)为复值全息图振幅;图 15(b)~(d)分别为全息图在 34、36、84 μm 处的重建像及其强度分布曲线;图 15(e)中蓝色线为从单张全息图再现得到的底层微珠再现像强度沿 z 向变化的曲线,红色线为使用宽场显微得到的该微珠强度像沿 z 向对焦距离变化的曲线(图中给出了 28 个深度处的数据);图 15(f)~(h)分别

为使用 640、555、488 nm 激发荧光微珠时在图 15(b)中所示平面的再现像;图 15(j)~(l)分别为在图 15(d)所示平面的再现像;图 15(i)和(m)对应于图 15(b)和(d)所示平面处的红绿蓝(RGB)三通道合成彩色图像;对于 0.5 μm 微珠在 63 倍数值孔径 1.4 的油浸显微物镜下得到的实验结果,图 15(n)为单幅全息图,图 15(o)为复值全息图的振幅,图 15(p)~(r)为分别在 6、15、20 μm 平面处的再现像。图中用比例尺标示出了图像的尺寸。

基于非相干数字全息术可以直接通过数值算法得到或复制光波前并且可以采用非相干光源的特性, Kim^[47-48]提出了非相干数字全息自适应光学的概念,将非相干数字全息术的应用引入到自适应光学领域。非相干数字全息自适应光学系统中不需要使用波前传感器和变形镜等硬件设备进行波前的探测和波前像差校正,从而降低了系统的复杂性和成本。全息图数值再现的过程比传统自适应光学系统里的反馈循环过程快,并且从原理上基于全息术测波前形变的动态范围不受限制,形变程度变大仅会引起相位的包裹,并可以通过算法来消除其影响。由于可以实现全场、大动态范围的波前探测,并具有灵活多样的波前校正算法,该技术在天文学领域的应用具有广阔的前景。

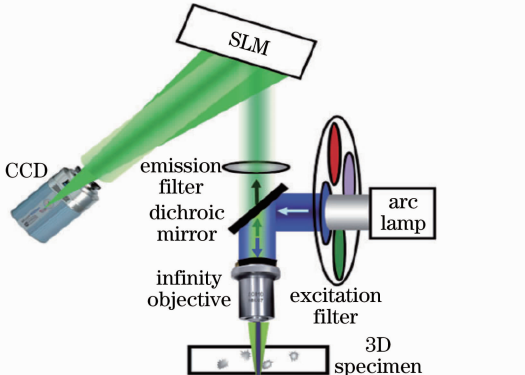


图 14 FINCHSCOPE 示意图

Fig. 14 Schematic of FINCHSCOPE

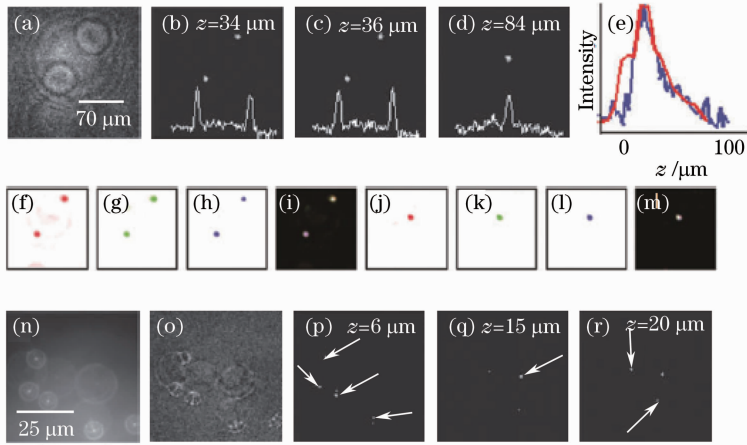


图 15 FINCHSCOPE 对多色荧光微珠记录的全息图和再现像

Fig. 15 FINCHSCOPE holography of polychromatic beads

4 结 论

对非相干数字全息术进行了详细介绍,该技术既不需要在空间域也不需要时间域对物体进行扫描,可以快速获取物空间的三维信息,具有三维追踪快速运动物体的能力。在优化系统配置或者结合其他的技术后,可以实现超分辨率高信噪比的三维成像。但非相干全息术中还存在需要进一步深入研究的问题。目前的研究主要聚焦于发展和完善重建算法以提高成像质量、探索非相干全息术与其他技术结合进行非相干全息图的快速记录与实时再现以提高成像时间分辨率、将非相干数字全息术的成像特性拓展到新的应用领域等方面。

随着新型电子元器件的出现以及相关领域理论的快速发展,在未来几年中非相干数字全息术也将在多方面取得突破性的进展。非相干数字全息术将继续在荧光显微等领域发挥作用;在非相干自适应光学等新兴领域,该技术也有其巨大的应用潜力;还可以将非相干全息术的基本原理扩展到太阳能孔径天线设计中以提高其耦合效率;在光场的相干性测量和控制、光场的相空间表达、对隐藏在强散射介质后的物体成像等领域,非相干数字全息的基本原理也具有很大的指导意义;非相干全息术还可以对空间通信技术、雷达技术等进行优化,提高其通信质量或者探测精度,为国防相关领域做出贡献。

参 考 文 献

- 1 D Gabor. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161 (4098): 777-778.
- 2 G L Rogers. Gabor diffraction microscopy the hologram as a generalized zone-plate[J]. Nature, 1950, 166(4214): 237.
- 3 L Mertz, N O Young. Fresnel transformations of images[C].

- Optical Instruments and Techniques, 1961. 305-310.
- 4 A W Lohmann. Wavefront reconstruction for incoherent objects [J]. J Opt Soc Am, 1965, 55(11): 1555-1556.
- 5 G W Stroke, R C Restrick. Holography with spatially incoherent light[J]. Appl Phys Lett, 1965, 7(9): 229-231.
- 6 G Cochran. New method of making Fresnel transforms with incoherent light[J]. J Opt Soc Am, 1966, 56(11): 1513-1517.
- 7 E N Leith, J Upatniek. Holography with achromatic-fringe systems[J]. J Opt Soc Am, 1967, 57(8): 975-980.
- 8 M Kato, T Suzuki. Fourier-transform holograms by Fresnel zone-plate achromatic-fringe interferometer[J]. J Opt Soc Am, 1969, 59(3): 303-307.
- 9 S Mallick, M L Roblin. Fourier transform holography using a quasimonochromatic incoherent source[J]. Appl Opt, 1971, 10 (3): 596-598.
- 10 O Bryngdahl, L Lohmann. One-dimensional holography with spatially incoherent light[J]. J Opt Soc Am, 1968, 58(5): 625-628.
- 11 A Kozma, N Massey. Bias level reduction of incoherent holograms[J]. Appl Opt, 1969, 8(2): 393-397.
- 12 E Ribak, C Roddier, F Roddier, *et al.*. Signal-to-noise limitations in white light holography[J]. Appl Opt, 1988, 27 (6): 1183-1186.
- 13 S G Kim, B Lee, E S Kim. Removal of bias and the conjugate image in incoherent on-axis triangular holography and real-time reconstruction of the complex hologram[J]. Appl Opt, 1997, 36 (20): 4784-4791.
- 14 S G Kim, B Lee, E S Kim, *et al.*. Resolution analysis of incoherent triangular holography[J]. Appl Opt, 2001, 40(26): 4672-4678.
- 15 S G Kim. Synthesis and analysis of optical transfer function of the modified triangular interferometer by two-pupil synthesis method[J]. J Opt Soc Korea, 2004, 8(4): 182-187.
- 16 S G Kim, J Ryeom. Phase error analysis of incoherent triangular holography[J]. Appl Opt, 2009, 48(34): H231-H237.
- 17 S G Kim. Analysis of effect of phase error sources of polarization components in incoherent triangular holography[J]. J Opt Soc Korea, 2012, 16(3): 256-262.
- 18 J Goodman, R Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. Appl Phys Lett, 1967, 11 (3): 77-79.
- 19 Zhao Jie, Wang Dayong, Li Yan, *et al.*. Experimental study on the quantitative phase-contrast imaging of the biological samples by digital holographic microscopy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37

- (11): 2906–2911.
- 赵洁,王大勇,李艳,等. 数字全息显微术应用于生物样品相衬成像的实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2906–2911.
- 20 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu. Recording and reconstruction of synthetic aperture digital holography [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(10): 1207–1211.
- 钟丽云,张以谟,吕晓旭. 合成孔径数字全息的记录、再现及实现[J]. 中国激光, 2004, 31(10): 1207–1211.
- 21 I Yamaguchi, T Zhang. Phase-shifting digital holography[J]. Opt Lett, 1997, 22(16): 1268–1270.
- 22 T C Poon. Scanning holography and two-dimensional image-processing by acousto-optic two pupil synthesis[J]. J Opt Soc Am A, 1985, 2(4): 521–527.
- 23 B W Schilling, T C Poon, G Indebetouw, *et al.*. Three-dimensional holographic fluorescence microscopy[J]. Opt Lett, 1997, 22(19): 1506–1508.
- 24 J Rosen, G Brooker. Digital spatially incoherent Fresnel holography[J]. Opt Lett, 2007, 32(8): 912–914.
- 25 R Kelner, J Rosen. Spatially incoherent single channel digital Fourier holography[J]. Opt Lett, 2012, 37(17): 3723–3725.
- 26 G Pedrini, H Li, A Faridian, *et al.*. Digital holography of self-luminous objects by using a Mach-Zehnder setup[J]. Opt Lett, 2012, 37(4): 713–715.
- 27 D N Naik, G Pedrini, W Osten. Recording of incoherent-object hologram as complex spatial coherence function using Sagnac radial shearing interferometer and a Pockels cell [J]. Opt Express, 2013, 21(4): 3990–3995.
- 28 G Indebetouw, A E Maghnoji, R Foster. Scanning holographic microscopy with transverse resolution exceeding the Rayleigh limit and extended depth of focus[J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22(5): 892–898.
- 29 G Indebetouw, W W Zhong. Scanning holographic microscopy of three-dimensional fluorescent specimens[J]. J Opt Soc Am A, 2006, 23(7): 1699–1707.
- 30 J Rosen, G Brooker. Fluorescence incoherent color holography [J]. Opt Express, 2007, 15(5): 2244–2250.
- 31 J Rosen, G Brooker. Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy[J]. Nat Photon, 2008, 2(3): 190–195.
- 32 B Katz, J Rosen. Super-resolution in incoherent optical imaging using synthetic aperture with Fresnel elements[J]. Opt Express, 2010, 18(2): 962–972.
- 33 G Brooker, N Siegel, V Wang, *et al.*. Optimal resolution in Fresnel incoherent correlation holographic fluorescence microscopy[J]. Opt Express, 2011, 19(6): 5047–5062.
- 34 B Katz, J Rosen, R Kelner. Enhanced resolution and throughput of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) using dual diffractive lenses on a spatial light modulator (SLM)[J]. Opt Express, 2012, 20(8): 9109–9121.
- 35 J Rosen, N Siegel, G Brooker. Theoretical and experimental demonstration of resolution beyond the Rayleigh limit by FINCH fluorescence microscopic imaging [J]. Opt Express, 2011, 19(27): 26249–26268.
- 36 P Bouchal, K Josef, C Radim, *et al.*. Point spread function and two-point resolution in Fresnel incoherent correlation holography [J]. Opt Express, 2011, 19(16): 15603–15620.
- 37 Y Tone, K Nitta, O Matoba, *et al.*. Analysis of reconstruction characteristics in fluorescence digital holography [C]. Digital Holography and Three-Dimensional Imaging OSA Technical Digest (CD), 2011. DTuC13.
- 38 J Hong, M K Kim. Resolution enhancement of incoherent digital holography using the super resolution image reconstruction technique [C]. Digital Holographic Optical Processing OSA Technical Digest (CD), 2013. DTh1A.3.
- 39 Chen Hao. Investigation of Key Problems on Fresnel Incoherent Correlation Holography [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. 34–44.
- 陈昊. 菲涅耳非相干相关数字全息术关键问题研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013. 34–44.
- 40 B Katz, D Wulich, J Rosen. Optimal noise suppression in Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) configured for maximum imaging resolution [J]. Appl Opt, 2010, 49(30): 5757–5763.
- 41 H Chen, Y H Wan, T L Man, *et al.*. Effect of phase-shift step on hologram reconstruction in Fresnel incoherent correlation holography[C]. SPIE, 2012, 8556: 85560L.
- 42 X M Lai, Y Zhao, X H Lü, *et al.*. Fluorescence holography with improved signal-to-noise ratio by near image plane recording[J]. Opt Lett, 2012, 37(13): 2445–2447.
- 43 N Siegel, J Rosen, G Brooker. Faithful reconstruction of digital holograms captured by FINCH using a Hamming window function in the Fresnel propagation[J]. Opt Lett, 2013, 38(19): 3922–3924.
- 44 S Nisan, J Rosen, G Brooker. Reconstruction of objects above and below the objective focal plane with dimensional fidelity by FINCH fluorescence microscopy[J]. Opt Express, 2012, 20(8): 19822–19835.
- 45 Y C Liu, L Y Zhong, X X Lu. White-light Fresnel incoherent correlation holography [C]. Asia Communication and Photonics Conference (ACP), 2012. AF4B.14.
- 46 T L Man, Y H Wan, H Chen, *et al.*. Quantitative evaluation of spatial phase light modulator characteristics in Fresnel incoherent correlation holography[C]. SPIE, 2012, 8556: 855613.
- 47 M K Kim. Adaptive optics by incoherent digital holography[J]. Opt Lett, 2012, 37(13): 2694–2696.
- 48 M K Kim. Incoherent digital holographic adaptive optics[J]. Appl Opt, 2013, 52(1): A117–A130.
- 49 Man Tianlong, Wan Yuhong, Jiang Zhuqing, *et al.*. Measurement of the spatial coherence of extended light source by twin beams-interference method[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(21): 214203.
- 满天龙, 万玉红, 江竹青, 等. 孪生光束干涉法测量光源的空间相干性[J]. 物理学报, 2013, 62(21): 214203.

栏目编辑:何卓铭