

· 特邀综述 ·

光学扫描全息术研究进展

任振波^{1*}, 林彦民^{2**}

¹西北工业大学物理科学与技术学院, 超常条件材料物理与化学教育部重点实验室, 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710129;

²香港大学工程学院电机与电子工程系, 香港

摘要 光学成像技术极大地拓展了人类的视觉极限, 提高了人们观察和理解现实世界的能力。越多地获得目标的 光学信息, 对其的认识越充分。数字全息术是一种可以将样本的三维信息以二维全息图的形式编码记录下来的一 种成像技术。通过获得由携带物体信息的物光波和参考光波叠加产生的干涉图案, 可以以数字化的方式实现多种 重建模态, 例如图像恢复、相位成像和切片成像等。光学扫描全息术是一种独特的数字全息成像技术, 通过主动式 二维化扫描对三维物体进行成像, 其完整的波前信息可以被单像素探测器记录, 并基于光外差检测进行信号解调, 从而恢复出复数全息图。对光学扫描全息术的最新进展进行介绍。首先, 基于双光瞳成像系统, 通过特殊的硬件 和算法设计, 提高光学成像系统的性能, 如提高空间分辨率、缩短扫描时间。其次, 基于计算成像原理, 通过改进和 优化全息像重建算法, 实现高质量的图像恢复, 主要涉及切片成像和三维成像等重建模态。第三, 介绍光学扫描全 息术的其他研究方向, 并讨论该领域未来可能的发展方向。

关键词 成像系统; 数字全息术; 光学扫描全息术; 计算成像; 图像重建

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0111009

Progress in Optical Scanning Holography

Ren Zhenbo^{1*}, Edmund Y. Lam^{2**}

¹MOE Key Laboratory of Material Physics and Chemistry under Extraordinary Conditions, Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China;

²Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China

Abstract Optical imaging technology has greatly expanded the limits of human vision and improved people's ability to observe and understand the real world. The more optical information of the object we can acquire, the more understanding we will get. Digital holography is an imaging technique that allows the three-dimensional information of a sample to be encoded and recorded in the form of a two-dimensional hologram. By obtaining the interference pattern generated by the superposition of the object light wave carrying object information and the reference light wave, multiple reconstruction modalities such as image recovery, phase imaging and optical sectioning can be realized in a digital way. Optical scanning holography (OSH) is a unique digital holography technique that uses active two-dimensional (2D) scanning to image a three-dimensional (3D) object and then uses a single-pixel detector to capture the complete wavefront information of the 3D object. By using optical heterodyne detection to demodulate the signal, a complex hologram is recovered. This review discusses and overviews the recent progress in the OSH technique, including three types of advancements. The first one focuses on the advancements in the performance of optical system, such as spatial resolution improvement and scanning-time reduction, using specially designed hardware and algorithm based on the characteristics of a two-pupil imaging system. The second type of advancement relates to reconstruction modalities, such as sectioning and 3D imaging, where reconstruction of high-quality image is achieved by improving and optimizing the holographic reconstruction algorithms based on the principle of computational imaging. The third one is the development of various research topics related to the OSH technique. This paper also discusses potential and presents some topics for future investigations.

收稿日期: 2019-09-29; 修回日期: 2019-11-05; 录用日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(61905197)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(310201911qd002)

* E-mail: zbren@nwpu.edu.cn; ** E-mail: elam@eee.hku.hk

Key words imaging systems; digital holography; optical scanning holography; computational imaging; image reconstruction

OCIS codes 110.1758; 090.1995; 100.3010

1 引 言

全息技术自 1948 年发明以来,经过数十年的发展和改进,已经成为一项非常重要的记录三维物体波前信息的成像技术^[1]。在传统的光学全息术基础上,数字全息术通过引入光电探测器和存储器件,将二维全息图以数字化的形式记录在电子设备中,并利用算法实现对记录的物体振幅和相位信息的数字化重建^[2]。成像过程对目标样品具有非侵入性,且无需对样品进行荧光标注即可记录,数字全息术已被广泛应用于生物成像^[3]、空气质量监测^[4]、半导体检测^[5]和表面形貌测量^[6]等领域。

光学扫描全息术(OSH)是一种特殊的数字全息成像模式。它可以通过主动式二维化扫描,将三维物体的波前信息以数字全息图的形式,通过单像素探测器记录下来,经过光外差解调后利用算法在电脑中对物体进行重建。OSH 最初是 Poon 等^[7]在利用声光外差法研究双极化非相干图像处理的过程中提出的,随后,扫描全息术的概念被系统化提出^[8]。OSH 的第一个演示实验报道于 1992 年^[9],光学扫描全息术的名称也被正式确认,旨在强调这种独特的基于主动式扫描的数字全息记录方法。自此以后,围绕着 OSH 开展了多方面的研究和应用,例如,扫描全息显微成像^[10]、三维物体识别^[11]、三维光学遥感^[12-13]、立体电视^[14]和三维信息加密^[15]等。

近年来,研究人员在基础科学和实践应用方面针对 OSH 开展了广泛的研究。本文将对 OSH 的基本原理、进展及现状进行概述。首先介绍双光瞳成像系统和光外差技术,进而详细介绍 OSH 的光学原理和数学模型,并分析 OSH 系统的相干性。之后,梳理和总结近些年 OSH 领域的研究热点和进展,主要针对以下三个方面:1)光学成像系统本身的性能的提高,如空间和时间分辨率、扩展成像系统景深和视场范围等;2)不同全息像重建模式下的成像质量的提高,主要包括光学切片成像、体积成像

和相位成像等其他全息像重建模式;3)OSH 领域的其他研究问题,如自动聚焦准确性的提高、彩色全息术、边缘提取、全息加密等问题。

2 OSH 基本原理

2.1 双光瞳光外差扫描成像

OSH 是一种特殊形式的数字全息成像技术,使用数字化记录方式,可以避免传统光学全息术中的漂白、显影等步骤,实现对物体的实时记录和再现。OSH 是在马赫-曾德尔干涉系统的基础上,基于光外差扫描成像原理,通过在两条光路中分别增加一个可调制的光瞳函数,并利用二维扫描振镜,实现了对目标物体的扫描。

具体来说,在光学成像系统中增加光瞳函数可以改变系统的空间滤波特性。光外差扫描系统需要实现两束光波的外差调制,因此在光学系统中需要两个光瞳函数^[16]。图 1 虚线框部分所示光路为基于马赫-曾德尔干涉仪改造的典型双光瞳光外差成像系统,主要采用主动式光学扫描和光外差解调法实现全息记录^[17]。如图 1 所示,频率为 ω 的准直激光进入干涉仪,经过分束器 BS1 后分别进入干涉仪的两臂。其中一路经反射镜 M1 反射后入射到光瞳 $p_1(x, y)$,另一路首先由声光调制器(AOFS)^[18]产生频移 Ω ,然后频率为 $\omega + \Omega$ 的光束经反射镜 M2 反射后入射到光瞳 $p_2(x, y)$ 上。两个光瞳分别位于焦距为 f 的透镜 L1 和 L2 的前焦平面上。两束光波经过两个光瞳后,由分束器 BS2 合成为一束光,并会聚到位于透镜 L1 后焦平面的二维扫描振镜上,合并光束发生干涉,形成干涉光斑,并对距离透镜 L1 后焦平面 z 处的三维物体 $\Gamma_0(x, y; z)$ 进行光栅式扫描。物体的透射光/散射光经透镜 L3 后由单像素光电探测器 PD 收集,产生电流 $i(x, y)$ 。随后,利用频率调制为 Ω 的带宽滤波器(BPF)对电流 $i(x, y)$ 进行滤波调制,并输出电流 $i_\Omega(x, y)$,其数学表达式^[19]为

$$i_\Omega(x, y; z) = \text{Re} \left[\int_D P_{1z}^* \left(\frac{k_0 x'}{f}, \frac{k_0 y'}{f} \right) P_{2z} \left(\frac{k_0 x'}{f}, \frac{k_0 y'}{f} \right) \times |\Gamma_0(x + x', y + y'; z)|^2 dx' dy' \exp(j\Omega t) \right] = \text{Re} [i_{\Omega_P}(x, y; z) \exp(j\Omega t)], \quad (1)$$

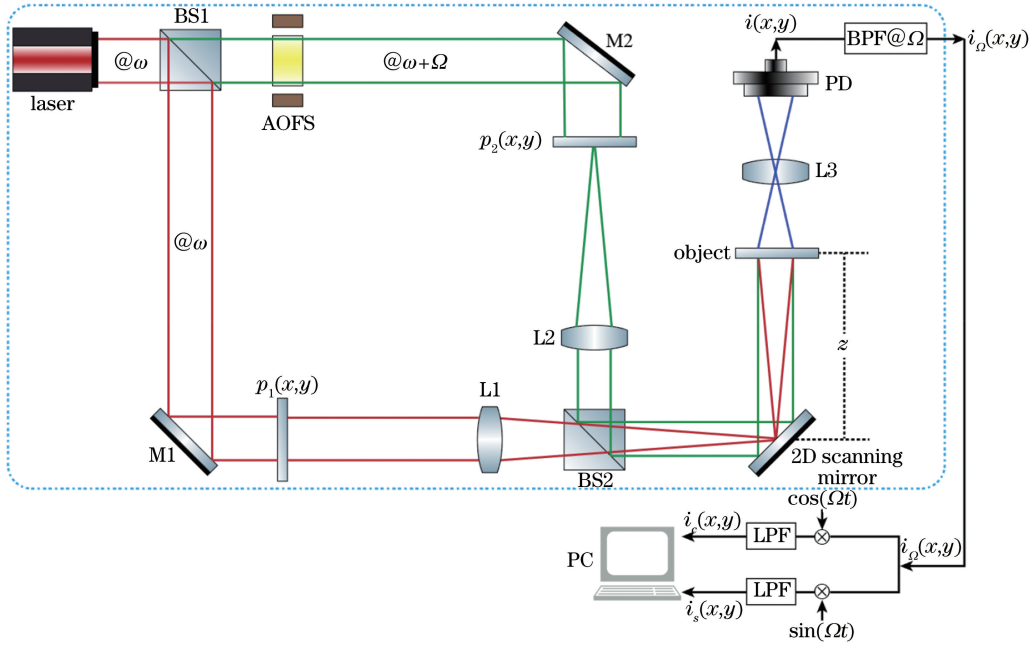


图 1 光学扫描全息实验系统,虚线框部分为典型的双光瞳光外差扫描成像系统

Fig. 1 Experimental system of optical scanning holography, where dashed box shows a typical two-pupil optical heterodyne scanning imaging system

式中: $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部; $*$ 表示取复共轭;
 $P_{1z}\left(\frac{k_0x}{f}, \frac{k_0y}{f}\right) = P_1\left(\frac{k_0x}{f}, \frac{k_0y}{f}\right) \otimes h(x, y; z)$, $i = 1, 2$, $P_i\left(\frac{k_0x}{f}, \frac{k_0y}{f}\right) = \mathcal{F}[p_i(x, y)]|_{k_x=k_0x/f, k_y=k_0y/f}$,
 $h(x, y; z) = \exp(-jk_0z) \frac{jk_0}{2\pi z} \exp\left[-\frac{jk_0(x^2+y^2)}{2z}\right]$
 为光束在自由空间进行菲涅耳衍射传输时的点扩展函数(PSF), \otimes 表示卷积运算, $\mathcal{F}(\cdot)$ 表示傅里叶变换, k_0 表示空间频率, k_x 和 k_y 分别表示 x 和 y 方向的空间频率; D 表示探测器有效区域; t 表示时间; $i_{\Omega P}(x, y; z)$ 表示包含物体 $\Gamma_0(x, y; z)$ 振幅和相位信息的光外差电流。

对(1)式进行简化,则光外差电流 $i_{\Omega P}(x, y; z)$ 可表示为

$$i_{\Omega P}(x, y; z) = P_{1z}\left(\frac{k_0x}{f}, \frac{k_0y}{f}\right) P_{2z}^*\left(\frac{k_0x}{f}, \frac{k_0y}{f}\right) \otimes |\Gamma_0(x, y; z)|^2. \quad (2)$$

从(2)式可以看出, $P_{1z}P_{2z}^*$ 可以是复数形式,则该式中不仅包含待测物体 $\Gamma_0(x, y; z)$ 的振幅信息,还可

以包含物体的相位信息,即将物体的波前信息以全息的方式记录了下来。因此,根据光学传递函数(OTF, $F_{OT-\Omega}$)的定义^[20],图1所示的双光瞳光外差式扫描系统的 OTF 可表示为

$$F_{OT-\Omega}(k_x, k_y; z) = \frac{\mathcal{F}[i_{\Omega P}(x, y; z)]}{\mathcal{F}[|\Gamma_0(x, y; z)|^2]} = \mathcal{F}\left[P_{1z}\left(\frac{k_0x}{f}, \frac{k_0y}{f}\right) P_{2z}^*\left(\frac{k_0x}{f}, \frac{k_0y}{f}\right)\right], \quad (3)$$

对(3)式的傅里叶变换进行展开, $F_{OT-\Omega}$ 也可表示为

$$F_{OT-\Omega}(k_x, k_y; z) = \exp\left[j\frac{z}{2k_0}(k_x^2 + k_y^2)\right] \times \iint p_1^*(x', y') p_2\left(x' + \frac{f}{k_0}k_x, y' + \frac{f}{k_0}k_y\right) \cdot \exp\left[j\frac{z}{f}(x'k_x + y'k_y)\right] dx' dy', \quad (4)$$

(4)式表明,对于 OSH 系统而言,可以根据应用中的实际需求设计特别的光瞳函数 $p_1(x, y)$ 和 $p_2(x, y)$,实现对系统传递函数的调制和改变。结合调制频率为 Ω 的带宽滤波器,利用 $\cos(\Omega t)$ 或 $\sin(\Omega t)$ 函数从 $i_{\Omega}(x, y)$ 中解调出同相分量,由此得到的两个输出可以分别表示为

$$i_c(x, y) = \text{Re}\left\{\mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}[|\Gamma_0(x, y; z)|^2]\right\} \cdot F_{OT-\Omega}(x, y; z) dz\right\} = \text{Re}\left[\int |\Gamma_0(x, y; z)|^2 \otimes h_{\Omega}(x, y; z) dz\right], \quad (5)$$

$$i_s(x, y) = \text{Im} \left\{ \int \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} \{ |\Gamma_0(x, y; z)|^2 \} \cdot F_{\text{OT}, \Omega}(x, y; z) dz \} \right. \\ \left. \text{Im} \left[\int |\Gamma_0(x, y; z)|^2 \otimes h_{\Omega}(x, y; z) dz \right], \right. \quad (6)$$

式中, $\text{Im}(\cdot)$ 表示取虚部; $h_{\Omega}(x, y; z)$ 为 $F_{\text{OT}, \Omega}(x, y; z)$ 的傅里叶逆变换。由(5)式和(6)式可以看出, 当 $\Gamma_0(x, y; z)$ 为三维物体时, 对轴向分量 z 进行积分得到的 $i_c(x, y)$ 和 $i_s(x, y)$ 是两个严格的二维分量, 且包含了物体的强度信息, 即实现了对三维物体的非相干成像(Incoherent imaging), 因此也可将(5)式和(6)式称为余弦和正弦菲涅耳波带片(FZP)全息图, 可以根据任意一个全息图恢复物体的波前信息。需要强调的是, 虽然这两个全息图都可以用来恢复物体信息, 但并不表明这两者是冗余的。因为即使 OSH 是以同轴全息的记录方式实现的, 也可以由此得到无共轭像的全息像重建。

2.2 OSH 的数学描述

为了实现扫描全息术的记录, 需要使用一个 FZP 型的脉冲响应对三维物体 $\Gamma_0(x, y; z)$ 进行光栅式扫描。因此, 可以根据(4)式, 设定光瞳函数 $p_1(x, y) = 1$ 和 $p_2(x, y) = \delta(x, y)$, 其中 $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数, OSH 系统的 $F_{\text{OT}, \Omega}$ 可以进一步表示为

$$F_{\text{OT}, \Omega}(k_x, k_y; z) |_{\text{OSH}} = \exp \left[-j \frac{z}{2k_0} (k_x^2 + k_y^2) \right]. \quad (7)$$

对(7)式进行傅里叶逆变换, 可以得到 OSH 系统的点扩展函数表达式为

$$h(x, y; z) |_{\text{OSH}} = -j \frac{k_0}{2\pi z} \exp \left[j \frac{k_0}{2z} (x^2 + y^2) \right]. \quad (8)$$

因此, 如果三维物体的函数表达式已知, 根据光学成像系统的 OTF 或 PSF, 可以得到 OSH 记录的复数形式的全息图。图 2 所示为 OSH 中的静态菲涅耳波带片, 即 OSH 系统典型的点扩展函数, 该函数和菲涅耳衍射的空间频率传递函数互为共轭。

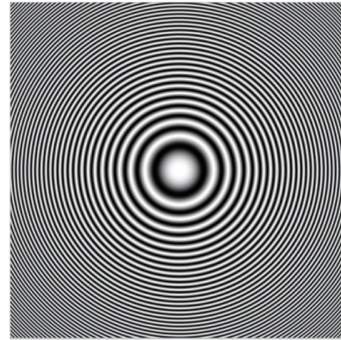


图 2 OSH 中的静态菲涅耳波带片
Fig. 2 Static Fresnel zone plate in OSH

值得注意的是, 从图 1 可以看出, 平行光经过透镜 L1 后在二维扫描振镜上形成一个点光源, 而经过透镜 L2 的光束形成一束平面波。因此, 对于距离振镜 $z = z_0$ 处的三维物体 $\Gamma_0(x, y; z)$ 来说, 扫描光束实际上是具有不同频率的发散球面波(频率为 ω)和平面波(频率为 $\omega + \Omega$)发生干涉后产生的干涉光, 其强度为

$$I_{\text{scan}}(x, y; z_0, t) = \left| a \exp[j(\omega + \Omega)t] + j \frac{k_0}{2\pi z_0} \exp \left[-j \frac{k_0(x^2 + y^2)}{2z_0} \right] \exp(j\omega t) \right|^2 = \\ A + B \sin \left[\frac{k_0}{2z_0} (x^2 + y^2) + \Omega t \right], \quad (9)$$

式中: a 为平面波振幅; 常数项 $A = a^2 + \left(\frac{k_0}{2\pi z_0} \right)^2$; $B = \frac{k_0}{\pi z_0}$ 。从(9)式可以看出, 扫描光斑是随时间变化的二维正弦函数, 因此该光斑又称为时变菲涅耳波带片(TDFZP)。图 2 所示为某一时刻的静态菲涅耳波带片, 随着时间的变化干涉条纹将不断向圆心收缩。OSH 就是利用图 2 所示的时变菲涅耳波带片对三维物体进行二维光栅式扫描, 并通过带通

滤波和光外差解调的方式实现了待测物体全息信息的记录。

2.3 扫描全息术的相干性

相较于常用的基于马赫-曾德尔干涉仪和迈克耳孙干涉仪的数字全息图记录方式而言, OSH 独特优势在于其可以通过设计光瞳函数及孔径函数, 实现相干全息成像和非相干全息成像。由(5)式和(6)式可以看出, 当待测物体 $\Gamma_0(x, y; z)$ 的强度信息即 $|\Gamma_0(x, y; z)|^2$ 被记录下来时, 系统实现

的是非相干记录。可以通过改变 OSH 系统的相干性来实现物体相位信息的记录。具体来说,在图 1 所示的 OSH 系统中,可以在光电探测器 PD 前放置一个孔径大小可变的孔径光阑 $M(x, y)$ 。

经过理论分析可知,通过改变孔径光阑 $M(x, y)$ 的孔径大小可改变和控制双光瞳扫描成像系统的相干性^[21-22]。

若 $M(x, y)=1$,则光外差输出电流 i_{Ω} 为

$$i_{\Omega}(t) \propto \operatorname{Re}\left[\int P_1^*(x', y'; z+z_0)P_2(x', y'; z+z_0) \times |\Gamma_0(x+x', y+y'; z)|^2 dx' dy' dz \exp(j\Omega t)\right]。(10)$$

(10)式和(1)式基本相同,可以实现对待测物体的强度信息(即 $|\Gamma_0(x, y; z)|^2$)的非相干记录。若

$M(x, y)=\delta(x, y)$,即在光电探测器前放置一个针孔光阑,则此时的输出电流 i_{Ω} 为

$$i_{\Omega}(t) \propto \operatorname{Re}\left\{\left[\int P_2(x', y'; z'+z_0)\Gamma_0(x+x', y+y'; z')dx' dy' dz'\right] \times \left[\int P_1^*(x'', y''; z''+z_0)\Gamma_0^*(x+x'', y+y''; z'')dx'' dy'' dz''\right] \exp(j\Omega t)\right\}。(11)$$

由(11)式可以看出,当待测物体 $\Gamma_0(x, y; z)$ 包含振幅信息和相位信息时,经两个光瞳函数 $p_1(x, y)$ 和 $p_2(x, y)$ 调制后,其完整的波前信息可以以全息图的形式记录下来,由此实现相干成像。此外,当 $M(x, y)$ 介于开放式光阑 $M(x, y)=1$ 和针孔光阑 $M(x, y)=\delta(x, y)$ 之间时,适当地改变 $M(x, y)$ 的大小可以实现部分相干成像^[23-24]。

光瞳 $p_2(x, y)$,通过控制小孔的横向位置,对系统的 PSF 进行调制,实现了 $0.7 \mu\text{m}$ 的轴向分辨率。类似地,文献[28]将光瞳 $p_2(x, y)$ 替换为特殊设计的螺旋形相位板,如图 3 所示,对 PSF 进行调制,使得记录的点源物体全息图的实部、虚部和相位部分产生了螺旋形调制,并且基于此调制,使得横向和轴向分辨率同时下降为原来的一半。Indebetouw 等^[29-30]基于合成孔径原理,将三幅离轴全息图合成一幅,提高了光学系统的数值孔径和空间分辨率,横向分辨率提升了 2 倍。Ren 等^[31]基于结构光照明原理,利用光栅将其中一路入射光束分成 0 级和 ± 1 级,然后在频域中对得到的三幅全息图进行合成,扩展了全息图的频率范围,在重建时提高了系统的空间分辨率。

3 OSH 的研究进展

近些年来,研究人员针对 OSH 中的基础问题和应用进行了深入研究。在本节中,将对几个研究方向的最新进展进行重点介绍。

3.1 提高成像系统的光学性能

受限于物理定律和成像过程中采用的光学元件参数,成像系统的光学性能,如空间分辨率和景深等参数的提高往往是有限的。因此,研究如何利用特殊的硬件设计和算法模型提高系统的分辨率具有重要意义。

3.1.2 提高时间分辨率

3.1.1 提高空间分辨率

光学系统的空间分辨率直接决定了该系统可以在多大的空间尺度上看清待测样本。针对 OSH 系统,基于多次记录原理,文献[25]提出使用双波长激光光源的方法,通过记录两张不同波长的全息图,实现了 $2.5 \mu\text{m}$ 的轴向分辨率。文献[26]通过两次记录位于不同轴向位置的物体,实现了 $1 \mu\text{m}$ 的轴向分辨率。由于 OSH 中包含两个可调制的光瞳函数,因此可以通过设计特别的光瞳函数得到尺度更小的点扩展函数。Ou 等^[27]采用空间光调制器代替

在 OSH 中,需要利用二维扫描振镜在笛卡儿坐标系中对待测物体进行光栅式扫描,缩短扫描时间可使将 OSH 应用于实时测量成为可能。因此,提高 OSH 的时间分辨率是研究热点之一。Chan 等^[32-33]基于待测物体具有稀疏性这一假设,提出一种利用压缩感知进行全息像重建的方法,如图 4 所示,将 OSH 的扫描方式由传统的光栅式扫描[图 4(a)]变为螺旋式扫描[图 4(b)],使得记录时的采样点数大幅减少,由此缩短了完成一次全息记录所需的采样时间。在随后的重建过程中,引入压缩感知方法,在只有较少采样点的前提下实现了与传统 OSH 相当的重建效果。Tsang 等^[34]提出了一种在光学扫描过程中对全息图像素点进

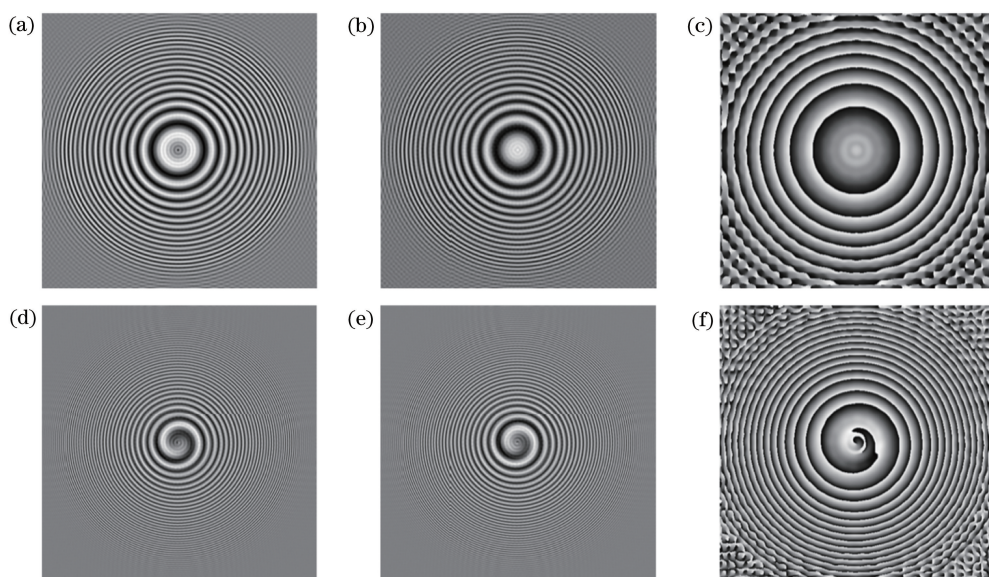


图 3 传统 OSH 和螺旋 OSH 对应的全息图^[28]。(a)传统 OSH 中全息图的实部;(b)传统 OSH 中全息图的虚部;(c)传统 OSH 中的全息图相位;(d)螺旋 OSH 中全息图的实部;(e)螺旋 OSH 中全息图的虚部;(f)螺旋 OSH 中的全息图相位
Fig. 3 Holograms in conventional and spiral OSHs^[28]. (a) Real part of hologram in conventional OSH; (b) imaginary part of hologram in conventional OSH; (c) phase of hologram in conventional OSH; (d) real part of hologram in spiral OSH; (e) imaginary part of hologram in spiral OSH; (f) phase of hologram in spiral OSH

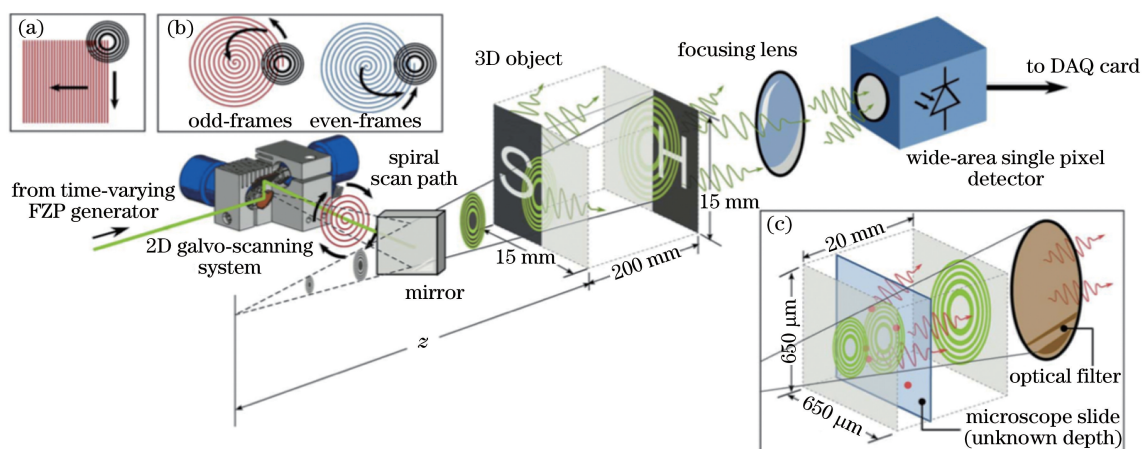


图 4 具有螺旋轨迹的 OSH^[33]。(a)光栅式扫描;(b)螺旋式扫描;(c)荧光分子的无透镜全息成像光路
Fig. 4 OSH with spiral trajectory^[33]. (a) Raster scanning; (b) spiral scanning;
(c) configuration for lensless holographic imaging of fluorescent beads

行选择的方法,使得采样点数量下降了 1~2 个数量级。即使全息图像素点只有原先数据量的 1%,仍可实现较高质量的重建。基于类似的原理, Tsang 等^[35-36] 进而提出了自适应 OSH 和自动决策及 delta 调制法,使得采样频率增加了 3.5 倍,压缩率变化超过 2 个数量级。

3.2 提高全息像重建质量

根据不同的重建目的,可将全息像重建分为几种不同的重建模式。除了常见的振幅成像和定量相位成像外,OSH 中的研究热点是利用三维物体实现

光学切片成像和体积成像,以及由此延伸出的扩展景深成像和深度图重建。

3.2.1 光学切片成像

OSH 中全息像重建的研究热点是光学切片成像,即在重建三维物体时,只重建出某一轴向位置上的切片图像,同时对其他距离处的切片产生的离焦噪声进行抑制^[37]。Kim^[38] 提出一种先将聚焦平面和离焦平面的功率谱从复数全息图中分离,再构建 Wiener 滤波器实现切片重建的方法。Kim 等^[39] 将 Wigner 分布函数与分数傅里叶变换结合,在相位空

间对在焦和离焦信息进行分离,从而实现了光学切片成像。此外,通过采用随机相位光瞳函数,不仅实现了光学切片成像,还通过定量分析给出了光瞳函数可能引入的误差及其影响^[40-41]。Li 等^[42]基于小波变换和连通域分析提出了一种图像融合算法,实现了光学切片成像。

文献^[43]提出一种通过求解逆问题实现离焦噪声抑制的方法,将聚焦平面重建的切片成像问题转化为求解最优化问题,并利用梯度下降法实现对该问题的求解。随后,Lam 等^[44]进一步拓展了该方法,实现了对实验采集到的三维生物荧光样本全息图的切片成像。如图 5 所示,通过对比图 5(a)和图 5(c)及图 5(b)和图 5(d)可知,重建图

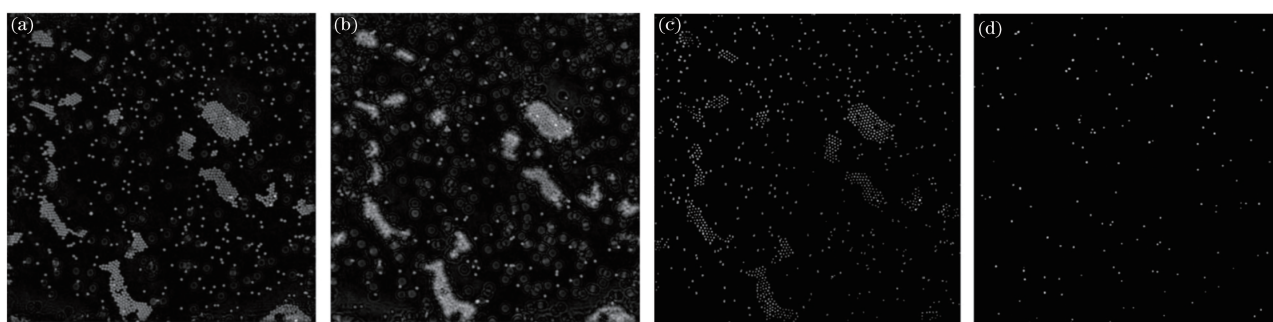


图 5 通过(a)(b)传统方法和(c)(d)逆成像方法重建的包含两层结构的三维荧光分子的切片图^[44]

Fig. 5 Sectioning images of 3D fluorescent beads with two-layer structure reconstructed by (a)(b) conventional reconstruction method and (c)(d) inverse imaging^[44]

3.2.2 其他类型的全息重建

除了切片重建模式外,常见的针对三维物体的重建方式还包括体积重建、扩展景深成像和深度图生成。Poon 等^[10]讨论了全息放大率在全息重建中的影响,并展示了 OSH 在三维显微中的成像能力和图像恢复能力。Schilling 等^[49]首次在实验上展示了利用 OSH 记录到的纵向间隔为 2 mm 的三维荧光样品的全息图及其重建图像,验证了该项技术的可行性和正确性。Indebetouw 等^[50]在 $1 \mu\text{m}$ 的横向分辨率尺度上实现了对颤藻叶样品和荧光花粉颗粒的全息记录,并展示了振幅、相位和三维重建结果。文献^[51]实现了对大尺寸三维物体的全息记录和强度重建。Liu 等^[52]通过使用一个大数值孔径的显微物镜,将扫描全息的横向分辨率和轴向分辨率分别提高到 $0.78 \mu\text{m}$ 和 $3.1 \mu\text{m}$,并且实现了对荧光样品的全息记录。

在提高成像系统景深方面:文献^[53]提出以香农熵作为自动聚焦的评价标准,并基于对焦深度法将自动聚焦概念扩展到像素级别,对每一个像素点所处深度进行了估计,如图 6 所示,实现了对三维荧

像中的离焦噪声得到了有效抑制,即采用所提方法实现了较好的重建结果。然而,这种求解逆问题的方法都是在 FZP 已知的前提下实现的,这就使得该方法无法在 FZP 未知的情况下使用。因此,Zhang 等^[45]对通过求解逆问题实现切片成像的方法进行了拓展,提出了一种盲切片成像法,即在 FZP 未知的情况下仍可实现较高质量的切片重建。此外,Zhang 等^[46-47]通过引入全变分正则项和非负约束,并采用原始对偶牛顿法和梯度映射进行最优化问题求解,得到了边缘锐利的切片重建结果。Tsang 等^[48]提出了一种基于迭代的盲切片成像方法,可以在快速实现切片成像的同时,较少地产生离焦噪声。

光分子的扩展景深成像[图 6(b)]和深度图生成[图 6(c)和图 6(d)]。Tsang 等^[54]采用类似的方案,通过确定每一个像素点的实际位置,对二进制物体的景深实现了 12 倍的增长。在此基础上,Tsang 等^[55]在文章中进一步提出加速方案,基于香农熵最小化原理和低通滤波器,实现了扩展景深成像。

此外,Dobson 等^[56]采用螺旋相位板作为光瞳函数,通过对其进行平移,并使用两组具有相同拓扑荷数的螺旋相位板和两组具有相反拓扑荷数的螺旋相位板,实现了对 OSH 系统的各向异性滤波,进而实现了重建图像的边缘增强。类似地,Pan 等^[57]将 delta 函数和螺旋相位板作为两个光瞳函数,用于产生时变涡旋光场,并利用此光场对物体进行扫描,以全息的方式记录物体的边缘信息,从而实现了物体的边缘提取。

3.3 其他方面的进展

在数字全息像重建中,一般需要先知道待测物体的真实位置,才能得到聚焦且清晰的重建像。物体的深度信息被编码并记录在全息图中,因此需要采用自动聚焦算法,在记录到的全息图基础上,对物

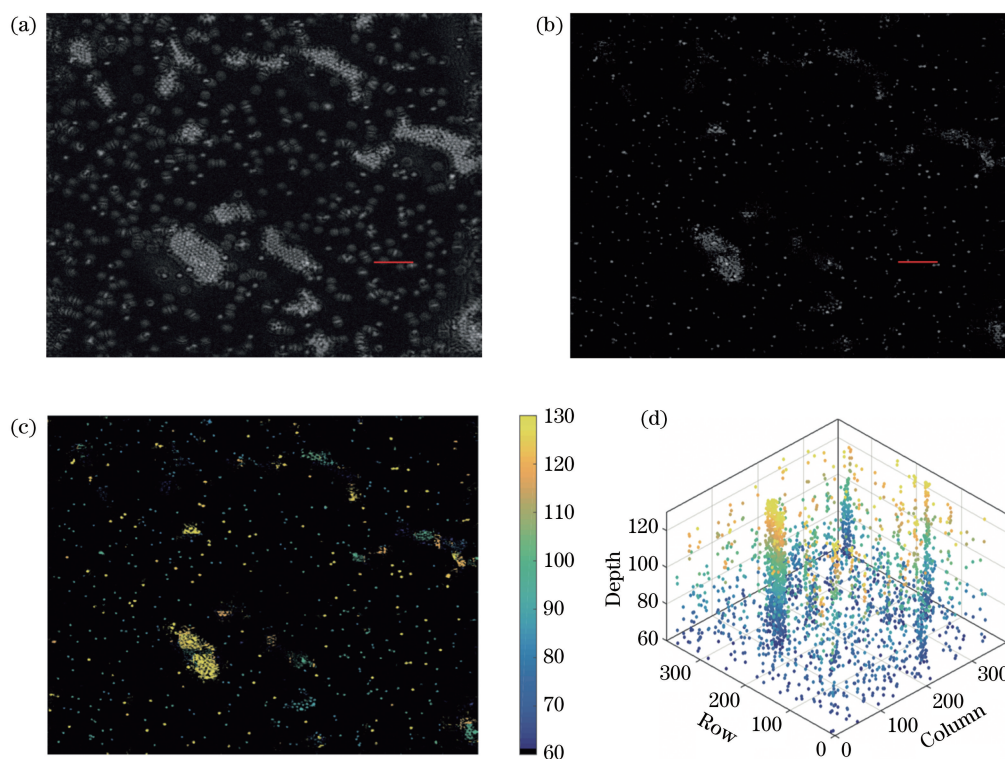


图 6 三维荧光分子的全息重建结果对比^[53]。(a)传统重建方法;(b)扩展景深成像;
(c)重建深度图;(d)重建深度图的 3D 表示

Fig. 6 Comparison of holographic reconstruction results of 3D fluorescent beads^[53]. (a) Conventional reconstruction method; (b) extended-depth-of-field imaging; (c) map of reconstruction depth; (d) 3D representation of reconstruction depth

体的实际位置进行提取。Ren 等^[53,58]提出以香农熵作为评价标准,通过计算一系列不同重建位置的图像的香农熵,得到了熵最小时对应的位置,即为物体的真实位置。Ren 等^[59-60]进而提出一种以结构张量为基础的新型评价标准,针对全息成像中三维物体不同深度的结构有重叠时的自动聚焦问题,取得了较准确的效果。Jiao 等^[61]提出先将全息图分解,再利用传统评价标准实现各个分解全息图的自动聚焦。Ou 等^[62-63]提出了基于时间反转技术和多重信号分类算法(MUSIC)的自动聚焦算法,随后又提出了基于连接域的自动聚焦算法,后者可以根据标记出来的域实现切片成像。

在全息显示中,计算全息(Computer generated holography)计算量大且无法对真实物体进行全息图生成。基于此,Leportier 等^[64]和 Liu 等^[65]提出了新的全息图转换的方法。Liu 等^[66]采用多个位于不同位置的探测器同时记录多幅全息图,再将这些全息图进行合成,基于这些合成图可以数字化地重建出理想的光照效果。Kim 等^[67]提出一种只需要进行单次扫描就可以实现彩色全息术的新方法,并给出了仿真结果。原始的扫描全息术中需要用到锁

模放大器,而锁模放大器十分复杂、昂贵。基于此,Liu 等^[68]提出一种新的信号解调方法——时空解调法,在实现同样效果的基础上降低了系统的成本和复杂度。

近年来,扫描全息术也产生了一些新的应用。Zhang 等^[69]将光瞳函数更改为随机相位,以此为基础测量平行透明板的平行度,并给出了理论分析和仿真结果。Poon^[14]和 Tsang 等^[70]还提出了扫描全息术在全息电视和全息显示方面的新应用。Tsang 等^[71]提出了一种基于 OSH 系统的两步加密方法。Liu 等^[72]提出了倾斜光学扫描全息方法,将扫描光束沿物体光轴倾斜一定角度,以较大采样间隔实现了离轴物光波的记录。Zeng 等^[73]通过理论和实验分析了三维 OSH 中的放大率问题,并指出了放大率与扫描角度、物体和探测器之间的距离相关。

4 结束语

数字全息术是当前光学成像领域的一个热门课题,在诸多交叉学科领域都有着广阔的应用前景。作为数字全息术的重要分支,OSH 以其独特的双光瞳调制和主动式二维化扫描记录方式,便捷地实现

了相干或非相干成像。基于带通滤波和光外差解调得到的复数全息图在全息像重建中不会产生共轭像。这些优势和特性都使得 OSH 在数字全息术中占有独特的地位。近些年,关于 OSH 的研究工作主要集中在如何利用新颖的理论和算法设计,并结合一定的硬件调制,解决和改善数字全息术中的现有问题。具体来说,通过结合特殊的硬件设计和算法理论,基于计算成像原理,来提高光学成像系统的性能。在此基础上,利用该技术实现了待测物体全息信息的快速记录、超分辨率成像及离焦噪声抑制的切片成像等,并成功地将该技术应用于三维成像、生物荧光显微以及信息恢复等领域。

尽管 OSH 已经发展了 30 多年,但该领域依然存在许多有待解决和完善的基础性问题。比如,如何通过改进扫描振镜和解调算法,真正实现实时记录和全息像重建? 如何设计更加先进和复杂度更低的算法,如基于学习的算法,进一步抑制离焦噪声,提高切片成像质量? 如何抑制扫描记录过程中的噪声问题,并将该技术更加广泛地应用到相干和非相干成像中? 我们相信,通过解决 OSH 中诸多基础和应用问题,该技术在生物成像、信息科学和微纳测量等领域将会具有广阔的应用潜力,并可为其他相关领域提供有效的科学工具。

参 考 文 献

- [1] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [2] Schnars U, Falldorf C, Watson J, et al. Digital holography and wavefront sensing [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- [3] Merola F, Memmolo P, Miccio L, et al. Tomographic flow cytometry by digital holography [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(4): e16241.
- [4] Wu Y C, Shiledar A, Li Y C, et al. Air quality monitoring using mobile microscopy and machine learning[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(9): e17046.
- [5] Pourvais Y, Asgari P, Abdollahi P, et al. Microstructural surface characterization of stainless and plain carbon steel using digital holographic microscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(5): B36-B41.
- [6] Cuche E, Marquet P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(34): 6994-7001.
- [7] Poon T C, Korpel A. Optical transfer function of an acousto-optic heterodyning image processor [J]. *Optics Letters*, 1979, 4(10): 317-319.
- [8] Poon T C. Scanning holography and two-dimensional image processing by acousto-optic two-pupil synthesis [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, 2(4): 521-527.
- [9] Duncan B D, Poon T C. Gaussian beam analysis of optical scanning holography [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, 9(2): 229-236.
- [10] Poon T C, Doh K B, Schilling B W, et al. Three-dimensional microscopy by optical scanning holography[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(5): 1338-1345.
- [11] Poon T C, Kim T. Optical image recognition of three-dimensional objects[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(2): 370-381.
- [12] Schilling B W, Templeton G C. Three-dimensional remote sensing by optical scanning holography [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(30): 5474-5481.
- [13] Klysubun P, Indebetouw G, Kim T, et al. Accuracy of three-dimensional remote target location using scanning holographic correlation [J]. *Optics Communications*, 2000, 184(5/6): 357-366.
- [14] Poon T C. Three-dimensional television using optical scanning holography [J]. *Journal of Information Display*, 2002, 3(3): 12-16.
- [15] Poon T C, Kim T, Doh K. Optical scanning cryptography for secure wireless transmission [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(32): 6496-6503.
- [16] Indebetouw G J M, Poon T-C. Novel approaches of incoherent image processing with emphasis on scanning methods[J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(10): 2159-2167.
- [17] Poon T C, Banerjee P P. Contemporary optical image processing with MATLAB [M]. UK: Elsevier Science Ltd, 2001.
- [18] Korpel A. Acousto-optics: a review of fundamentals [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1981, 69(1): 48-53.
- [19] Poon T C. Optical scanning holography with MATLAB©[M]. Boston, MA: Springer, 2007.
- [20] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. 4th ed. New York: W. H. Freeman, 2017.
- [21] Indebetouw G, Klysubun P, Kim T, et al. Imaging properties of scanning holographic microscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(3): 380-390.
- [22] Poon T C, Indebetouw G. Three-dimensional point spread functions of an optical heterodyne scanning image processor[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(8):

- 1485-1492.
- [23] Indebetouw G, Tada Y, Leacock J. Quantitative phase imaging with scanning holographic microscopy: an experimental assessment [J]. *Biomedical Engineering Online*, 2006, 5(1): 63.
- [24] Liu J P. Spatial coherence analysis for optical scanning holography[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(1): A59-A66.
- [25] Ke J, Poon T C, Lam E Y. Depth resolution enhancement in optical scanning holography with a dual-wavelength laser source [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(34): H285-H296.
- [26] Ou H Y, Poon T C, Wong K K Y, et al. Depth resolution enhancement in double-detection optical scanning holography [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(13): 3079-3087.
- [27] Ou H Y, Poon T C, Wong K K Y, et al. Enhanced depth resolution in optical scanning holography using a configurable pupil[J]. *Photonics Research*, 2014, 2(2): 64-70.
- [28] Chen N, Ren Z B, Ou H Y, et al. Resolution enhancement of optical scanning holography with a spiral modulated point spread function[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(1): 1-6.
- [29] Indebetouw G, Zhong W W, Chamberlin-Long D. Point-spread function synthesis in scanning holographic microscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(7): 1708-1717.
- [30] Indebetouw G, Tada Y, Rosen J, et al. Scanning holographic microscopy with resolution exceeding the Rayleigh limit of the objective by superposition of off-axis holograms [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(6): 993-1000.
- [31] Ren Z B, Lam E Y. Super-resolution imaging in optical scanning holography using structured illumination[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10022: 1002203.
- [32] Chan A C S, Wong K K Y, Tsia K K, et al. Reducing the acquisition time of optical scanning holography by compressed sensing[C]//*Imaging and Applied Optics 2014*, July 13-17, 2014, Seattle, Washington, United States. Washington, D. C. : OSA, 2014: SM4F.4.
- [33] Chan A C S, Tsia K K, Lam E Y. Subsampled scanning holographic imaging (SuSHI) for fast, non-adaptive recording of three-dimensional objects [J]. *Optica*, 2016, 3(8): 911-917.
- [34] Tsang P W M, Liu J P, Poon T C. Compressive optical scanning holography[J]. *Optica*, 2015, 2(5): 476-483.
- [35] Tsang P W M, Poon T C, Liu J P. Adaptive optical scanning holography[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21636.
- [36] Tsang P W M, Poon T C, Liu J P, et al. Low complexity compression and speed enhancement for optical scanning holography [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34724.
- [37] Conchello J, Lichtman J W. Optical sectioning microscopy[J]. *Nature Methods*, 2005, 2(12): 920-931.
- [38] Kim T. Optical sectioning by optical scanning holography and a Wiener filter[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5): 872-879.
- [39] Kim H, Min S W, Lee B, et al. Optical sectioning for optical scanning holography using phase-space filtering with Wigner distribution functions [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(19): D164-D175.
- [40] Xin Z, Dobson K, Shinoda Y, et al. Sectional image reconstruction in optical scanning holography using a random-phase pupil [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2934-2936.
- [41] Wu X L, Zhou X, Wang Q H, et al. Deviation influences on sectional image reconstruction in optical scanning holography using a random-phase pupil[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(1): A360-A366.
- [42] Li J X, Zhou D F, Yuan S, et al. Modified image fusion technique to remove defocus noise in optical scanning holography [J]. *Optics Communications*, 2018, 407: 234-238.
- [43] Zhang X, Lam E Y, Poon T C. Reconstruction of sectional images in holography using inverse imaging [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 17215-17226.
- [44] Lam E Y, Zhang X, Vo H, et al. Three-dimensional microscopy and sectional image reconstruction using optical scanning holography [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(34): H113-H119.
- [45] Zhang X, Lam E Y, Kim T, et al. Blind sectional image reconstruction for optical scanning holography [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3098-3100.
- [46] Zhang X, Lam E Y. Edge-preserving sectional image reconstruction in optical scanning holography [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(7): 1630-1637.
- [47] Lam E Y. Computational sectioning and resolution enhancement in optical scanning holography [C]//*Imaging and Applied Optics 2014*, July 13-17, 2014, Seattle, Washington, United States. Washington, D.C. : OSA, 2014: DTu2B.1.
- [48] Tsang P W M, Cheung K W K, Kim T, et al. Fast reconstruction of sectional images in digital holography[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2650-2652.

- [49] Schilling B W, Poon T C, Indebetouw G, et al. Three-dimensional holographic fluorescence microscopy[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(19): 1506-1508.
- [50] Indebetouw G, Zhong W W. Scanning holographic microscopy of three-dimensional fluorescent specimens[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(7): 1699-1707.
- [51] Liu J P. Optical scanning holography for three-dimensional imaging [C]//2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), July 22-24, 2015, Cambridge, United Kingdom. New York: IEEE, 2015: 727-731.
- [52] Liu J P, Tsou C H. Three-dimensional imaging of micro-specimen by optical scanning holography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10251: 102510D.
- [53] Ren Z, Chen N, Lam E Y. Extended focused imaging and depth map reconstruction in optical scanning holography[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(5): 1040-1047.
- [54] Tsang P W M, Poon T C, Kim T, et al. Fast reconstruction of digital holograms for extended depths of field[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(7): 070901.
- [55] Tsang P, Poon T C, Liu J P. Fast extended depth-of-field reconstruction for complex holograms using block partitioned entropy minimization[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(5): 830.
- [56] Dobson K K, Jia W, Poon T C. Anisotropic edge enhancement in optical scanning holography with spiral phase filtering[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(1): 010006.
- [57] Pan Y, Jia W, Yu J, et al. Edge extraction using a time-varying vortex beam in incoherent digital holography[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(14): 4176-4179.
- [58] Ren Z B, Chen N, Chan A, et al. Autofocusing of optical scanning holography based on entropy minimization [C]//Digital Holography & 3-D Imaging Meeting, May 24-28, 2015, Shanghai, China. Washington, D.C.: OSA, 2015: DT4A.4.
- [59] Ren Z, Lam E Y. Edge-preserving autofocusing in digital holography [C]//Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, May 29-June 1, 2017, JeJu Island, Korea. Washington, D. C.: OSA, 2017: W2A.29.
- [60] Ren Z B, Chen N, Lam E Y. Automatic focusing for multisectional objects in digital holography using the structure tensor[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1720-1723.
- [61] Jiao S M, Tsang P W M, Poon T C, et al. Enhanced autofocusing in optical scanning holography based on hologram decomposition[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(5): 2455-2463.
- [62] Ou H Y, Wu Y, Lam E Y, et al. Axial localization using time reversal multiple signal classification in optical scanning holography [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 3756-3771.
- [63] Ou H Y, Wu Y, Lam E Y, et al. New autofocus and reconstruction method based on a connected domain [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2201-2203.
- [64] Leportier T, Park M C, Kim Y S, et al. Converting optical scanning holograms of real objects to binary Fourier holograms using an iterative direct binary search algorithm[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3403-3411.
- [65] Liu J P, Wang S Y, Tsang P W M, et al. Nonlinearity compensation and complex-to-phase conversion of complex incoherent digital holograms for optical reconstruction[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14582-14588.
- [66] Liu J P, Wang S Y. Stereo-lighting reconstruction of optical scanning holography[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(5): 1664-1669.
- [67] Kim H, Kim Y S, Kim T. Full-color optical scanning holography with common red, green, and blue channels [Invited] [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A17-A21.
- [68] Liu J P, Luo D Z, Lu S H. Spatial-temporal demodulation technique for heterodyne optical scanning holography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 68: 42-49.
- [69] Zhang L Z, Hu J P, Wan D M, et al. Innovative measurement of parallelism for parallel transparent plate based on optical scanning holography by using a random-phase pupil [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2483-2488.
- [70] Tsang P W M, Poon T C. Review on the state-of-the-art technologies for acquisition and display of digital holograms [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(3): 886-901.
- [71] Tsang P W M, Yan A M, Poon T C, et al. Asymmetrical and biometric encrypted optical scanning holography (ABE-OSH) [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019: 1.
- [72] Liu J P, Wen H H. Optical scanning tilt holography [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(11): 6139-6145.
- [73] Zeng J J, Sui X B, Zhang H B. Magnification rate in three-dimensional optical scanning holography recording[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(5): 353-356.