

卤素灯照明光栅衍射共路数字全息显微定量相位成像

张佳恒, 马利红, 李勇, 金洪震

浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004

摘要 数字全息显微术是数字全息术和光学显微术相结合的定量相位成像技术。为克服高相干光源(激光)照明产生的散斑噪声和寄生条纹噪声,以及参物光路分离系统结构的不稳定性(易受外界震动干扰),实现了白光照明(卤素灯照明)的基于光栅衍射的共路离轴数字全息显微定量相位成像。首先基于理论分析和计算,得出系统可采用的光学元件参数和系统结构参数;然后建立了一套卤素灯照明的光栅衍射共路数字全息显微成像系统;最后对系统的成像准确度和时空噪声进行了测量。实验结果表明,该系统具有高准确度的成像性能,并具有非常高的时空敏感性(空间噪声为 0.6 nm,时间噪声为 0.04 nm)。

关键词 全息; 定量相位成像; 白光; 共路离轴; 光栅衍射

中图分类号 TB87.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0609003

Halogen-Light Quantitative Phase Imaging with Common-Path Digital Holographic Microscopy Based on Grating Diffraction

Zhang Jiaheng, Ma Lihong, Li Yong, Jin Hongzhen

Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract In order to eliminate a large amount of speckle noise and parasitic interference fringes noise caused by high coherence light source (laser), as well as the effects from the mechanical vibrations and air fluctuations which typically affect any uncommon-path interferometric system, we design and establish a white-light (halogen-light) common-path digital holographic microscope based on the grating diffraction. First, the parameters of the selected optical elements and the optical system are derived by theoretical analysis and calculation. Then, a common-path off-axis digital holographic microscope based on grating diffraction, which uses a halogen lamp as the illumination light source, is constructed. At last, the imaging accuracy and the spatiotemporal noise of the system are measured. Experimental results demonstrate that the established digital holographic microscope has a very high accurate imaging performance and spatiotemporal sensitivity with the spatial noise of 0.6 nm and the temporal noise of 0.04 nm.

Key words holography; quantitative phase imaging; white-light; common-path and off-axis; grating diffraction

OCIS codes 090.2910; 050.1940

1 引言

数字全息显微术^[1-9]是数字全息术和光学显微术相结合的定量显微相位成像技术。全息图带有物光波振幅和相位的全部信息。将数字全息技术和显微技术相结合,可以精确地获取样品的高分辨率相位信息。由于其可以实现无标记、无损伤、全场定量

测量,数字全息显微术具有其他显微技术不可替代的优势,是一种比较理想的定量相位成像方法。然而,传统的数字全息显微术存在两方面无法克服的困难。一是采用高相干照明光源(激光照明),产生无法消除的激光散斑和寄生条纹噪声;二是参物光路分离的系统结构,导致系统对外界扰动影响敏感,测量时间稳定性差。

收稿日期: 2017-11-09; 收到修改稿日期: 2017-12-16

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY17F050002)、国家自然科学基金(60877002)

作者简介: 张佳恒(1992—),男,硕士研究生,主要从事数字全息显微术方面的研究。E-mail: 565293676@qq.com

导师简介: 马利红(1979—),女,博士,副教授,主要从事光信息处理、全息术、计算成像光学等方面的研究。

E-mail: zjnumlh@zjnu.cn (通信联系人)

采用低相干光源照明的数字全息显微系统能很好地抑制激光散斑噪声和相干寄生条纹噪声,提高测量精度^[10-13]。但是,为了克服相干长度短的问题,即保证干涉条纹的对比度,低相干照明的光路系统往往需要复杂的光路结构。共路数字全息显微系统^[14-18]是指物光和参考光经过完全相同路径的干涉显微装置,可以有效地克服外界扰动,提高系统稳定性,同时可以保证参物光路光程相等。因此,低相干共路数字全息显微成像能够很好地克服传统数字全息显微成像的固有缺陷,已引起广泛的关注^[19-23]。

本文实现了白光照明的基于光栅衍射的共路离轴数字全息显微定量相位成像。首先基于理论分析和计算,得出系统可采用的光学元件参数和系统结构参数;然后建立了一套卤素灯照明的光栅衍射共路离轴数字全息显微成像系统;最后对系统的成像准确度和时空噪声进行了测量。实验结果表明,该系统不仅具有高准确度的成像性能,而且具有非常高的时空敏感性(空间噪声为 0.6 nm,时间噪声为 0.04 nm)。

2 光栅衍射白光共路离轴数字全息显微系统

图 1 为基于光栅衍射的白光共路离轴数字全息显微系统的光路系统原理示意图,其在明场光学显微镜的基础上附加了一个 $4f$ 结构光学模块。图 1 虚线框中即为明场光学显微镜的光路示意,后面的 $4f$ 结构光学模块即为建立的光栅衍射共路离轴数字全息显微系统。首先,在明场显微镜的像平面(也即 $4f$ 系统的输入平面)上放置一个黑白光栅,利用光栅的分光功能,产生多个携带完整样品信息的衍射级次。然后,在 $4f$ 系统的傅里叶变换平面(频谱平面),利用滤波器滤出 0 级和 +1 级光,滤波器设计如图 1 中所示。让 +1 级光完整通过,作为物光波场,而对 0 级光进行进一步低频滤波,只让 0 级光中的直流部分通过,作为参考光。最后,将滤波后得到的 0 级光和 +1 级光经 $4f$ 系统中的第二块透镜傅里叶变换后,叠加干涉形成全息图。系统中的 $4f$ 系统形成一个马赫-曾德尔干涉结构,利用 0 级和 +1 级光的夹角形成离轴干涉。

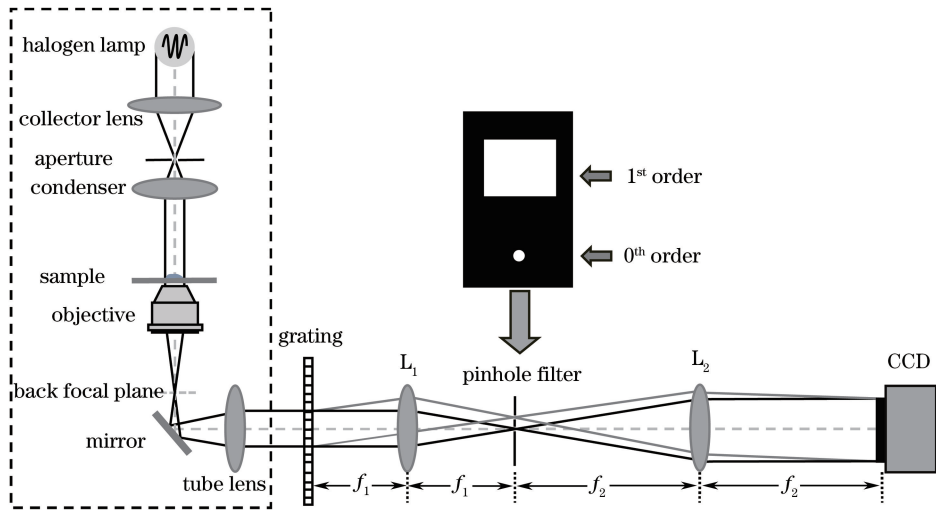


图 1 基于光栅衍射的白光共路离轴数字全息显微系统原理图

Fig. 1 Schematic of white-light common-path off-axis digital holographic microscope based on grating diffraction

系统采用的照明光源为卤素灯,并用白光平衡滤波片滤色。用光谱仪测量其光谱分布。在色温 $T_c = 3200$ K 时,光谱分布曲线如图 2 中蓝色曲线所示,其等效功率带宽(PEB)^[24]如图 2 中红色虚线所示。由等效功率带宽得到,光源的中心波长 $\lambda = 574$ nm,带宽 $\Delta\lambda = 179$ nm。由相干长度 $l_c = \lambda^2 / (\Delta\lambda)$,得到该卤素灯光源的相干长度 $l_c = 1.8 \mu\text{m}$ 。同时,卤素灯是扩展光源,为了提高其空间相干性,采用科勒照明光路结构,并将照明数值孔径设置到最小,

$NA = 0.09$,提高空间相干性。文献[22]详细分析了照明数值孔径大小与相位测量准确度的关系。

在 CCD 相机记录面,假设物光波为 $O(x_H, y_H)$,参考光波为 $R(x_H, y_H)$,两光波叠加后的光强分布为

$$I(x_H, y_H) = |R(x_H, y_H) + O(x_H, y_H)|^2 = |R(x_H, y_H)|^2 + |O(x_H, y_H)|^2 + R^*(x_H, y_H)O(x_H, y_H) + R(x_H, y_H)O^*(x_H, y_H). \quad (1)$$

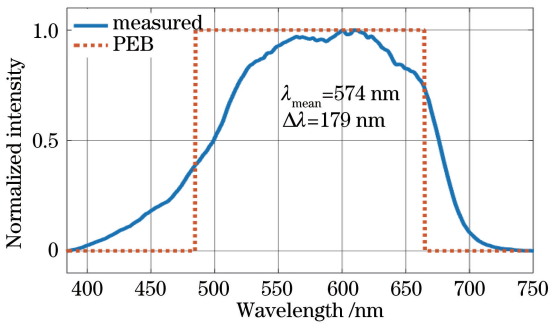


图 2 系统所用卤素灯的功率谱

Fig. 2 Spectrum of the halogen lamp used in the system

基于离轴全息图的三项分离条件、全息图记录的采样条件以及光栅的衍射原理,可以计算得到各个光学元器件的光学参数和系统光路的结构参数。已知系统中采用的显微物镜为放大倍率为 40,数值孔径为 0.75,则在照明聚光镜的数值孔径近似为 0 的照明条件下,明场显微镜的最小分辨距离为

$$\Delta\rho \approx \frac{1.22\lambda}{NA_{obj}}, \quad (2)$$

式中 $\lambda = 574 \text{ nm}$ 为卤素灯光谱的中心波长, $NA_{obj} = 0.75$ 为显微物镜的数值孔径,计算可得 $\Delta\rho = 0.93 \text{ }\mu\text{m}$ 。显微放大 40 倍后,像平面即光栅平面的最小衍射光斑宽度为 $37.2 \text{ }\mu\text{m}$ 。为满足奈奎斯特采样条件,衍射光栅的光栅常数必须小于等于 $18.6 \text{ }\mu\text{m}$ 。但是,基于离轴全息的三项分离原则,在光栅平面,光栅调制得到的参考光载频至少为样品在该平面最高频率的 3 倍,即

$$\beta \geq \frac{3k_0 NA_{obj}}{M_{obj}}, \quad (3)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda$, β 为光栅调制频率, $\beta = 2\pi/\Lambda$, Λ 为光栅常数, M_{obj} 为物镜横向放大倍数,最后可得光栅常数必须满足

$$\Lambda \leq \frac{\lambda M_{obj}}{3NA_{obj}}. \quad (4)$$

将物镜参数和中心波长参数代入(4)式,计算可得 $\Lambda \leq 10.2 \text{ }\mu\text{m}$ 。在系统中,实际采用光栅的光栅常数为 $7.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。

同时为了让 CCD 相机能够对全息图进行正确采样,采样频率也必须满足奈奎斯特采样定理,即 CCD 采样频率 k_s 必须大于等于全息图最高频率的 2 倍:

$$\left(k_s = \frac{2\pi}{a}\right) \geq \left(2k_{\max} = 2 \frac{\beta + k_0 NA_{obj}/M_{obj}}{M_{4f}}\right), \quad (5)$$

式中 a 为 CCD 相机的像元间距, M_{4f} 为 4f 系统横

向放大倍率。则由(5)式可得,4f 系统的横向放大倍率必须满足

$$|M_{4f}| \geq 2a \left[\frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\lambda} \frac{NA_{obj}}{M_{obj}} \right]. \quad (6)$$

在系统中,采用的 CCD 相机像元间距 $3.45 \text{ }\mu\text{m} \times 3.45 \text{ }\mu\text{m}$,计算可得 $M_{4f} \geq 1.14$ 。

但是,透镜 L_1 和 L_2 的参数选择除了必须满足(6)式的横向放大倍率,还必须保证 0 级和 +1 级光波场能完整地通过 4f 系统。结合光栅衍射和样品在光栅平面的最高频率,得到透镜 L_1 和 L_2 的数值孔径 NA_1 和 NA_2 必须满足:

$$\begin{cases} NA_1 \geq \frac{\lambda}{\Lambda} + \frac{NA_{obj}}{M_{obj}} \\ NA_2 \geq \frac{1}{|M_{4f}|} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} + \frac{NA_{obj}}{M_{obj}} \right) \end{cases}. \quad (7)$$

将各参数代入(7)式,计算可得 $NA_1 \geq 0.095$,而 NA_2 还与 4f 系统实际的放大倍率有关。综合 4f 系统横向放大倍率和系统对透镜数值孔径的要求,系统中实际采用的透镜 L_1 焦距为 5.5 cm,数值孔径为 0.32;透镜 L_2 焦距为 15 cm,数值孔径为 0.16。系统实际横向放大倍率 $M_{4f} = 3.0$ 。

系统中另一个重要的器件是滤波光阑。首先确定 0 级和 +1 级光谱的中心位置,以 0 级谱中心为坐标原点,+1 级谱的中心位置则可根据光栅衍射计算得到:

$$\Delta x = \frac{f_1 \lambda}{\Lambda}, \quad (8)$$

式中 f_1 表示透镜 L_1 的焦距。+1 级的滤波孔径尺寸设计比较简单,一般设置得足够大,保证 +1 级光能完全通过,但不能让其他级次的光进入该滤波孔径。0 级的滤波孔径只允许直流部分通过,使得滤波后到达相机平面的参考光波是均匀的平面光波。为得到 0 级滤波孔径的尺寸大小,需要移除光栅和样品,此时直接在 4f 系统的频谱面测量得到的光谱尺寸大小即为 0 级滤波孔径的匹配尺寸。实际系统中,0 级滤波孔径的直径为 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 。

3 相位像重建数据处理

对获取的数字全息图进行数值重建,得到被测样品的物光场分布,进而得到被测样品的相位分布。首先对测量得到的像面数字全息图进行傅里叶变换,得到全息图的频谱分布。然后对频谱图进行滤波处理,利用离轴全息图三项频谱分离的特点,直接滤除零级项和共轭项,得到只包含物光波的频谱分

布。最后再经过傅里叶逆变换,得到只包含物光波的复数场:

$$U(x_H, y_H) = R^*(x_H, y_H)O(x_H, y_H). \quad (9)$$

由于计算得到的是物光波复振幅分布,因此可以同时得到样品像的光强和相位分布:

$$I(x_H, y_H) = |U(x_H, y_H)|^2, \quad (10)$$

$$\varphi(x_H, y_H) = \arctan\left\{\frac{\text{Im}[U(x_H, y_H)]}{\text{Re}[U(x_H, y_H)]}\right\}, \quad (11)$$

式中 $\text{Im}()$ 表示取复振幅的虚部, $\text{Re}()$ 表示取实部。但是,由(11)式得到的相位值分布在 $[-\pi, \pi]$ 区间,是四象限包裹相位值。因此,一般情况下,要得到物体的真实相位分布还需要利用二维解包裹算法得到展开的相位分布。本文采用基于离散余弦变换(DCT)的最小二乘相位解包裹算法^[25]。

由(11)式可知,要得到准确的相位重构,即要得到准确的物光场重建。首先根据(9)式,为消除参考光波的影响,需要数值生成一个数字照明光波,其必须是原参考光波的准确复制。其次,样品经显微物镜放大成像,因此在像平面会产生一个附加的二次相位因子。为了准确重建,这个二次相位因子也必须被消除。

本文采用参考平面相位相减的方法获取准确的相位重构^[26]。其基本思想是:在同一个光路系统

放置样本的情况下记录的干涉图;一幅称为样本全息图,即在记录系统中放置了样本后记录的全息图。两幅全息图各自数值再现,经过相位解包裹计算后得到各自的相位分布,再经过相减处理得到样品的准确相位分布。这种方法不但能消除参考光波和显微成像附加的相位因子,而且能消除成像系统的像差以及其他背景噪声,因此能得到样品的准确相位信息。

4 系统成像的准确性

为了测量这套白光共路离轴数字全息显微系统的成像准确性,选用标准聚苯乙烯微球作为被测样品,微球直径为 $(2 \pm 0.05) \mu\text{m}$, 折射率为 1.59。取少量微球散落于载玻片,等水分蒸发完后,滴入奥林巴斯物镜浸油(折射率为 1.518)浸没微球,并盖上盖玻片。将此标准样品放入载物台,进行调焦,使之成像于 CCD 相机平面。记录的全息图如图 3(a)所示。将红色矩形框内的部分全息图放大显示,如图 3(b)所示,可以清晰地显示干涉条纹。对全息图图 3(a)进行频域滤波,再经傅里叶逆变换得到物光波复振幅,对物光波复振幅求反正切值得到包裹相位,利用基于 DCT 的最小二乘解包裹算法进行解包裹运算。采用减去参考平面相位的方法进行相位补偿。

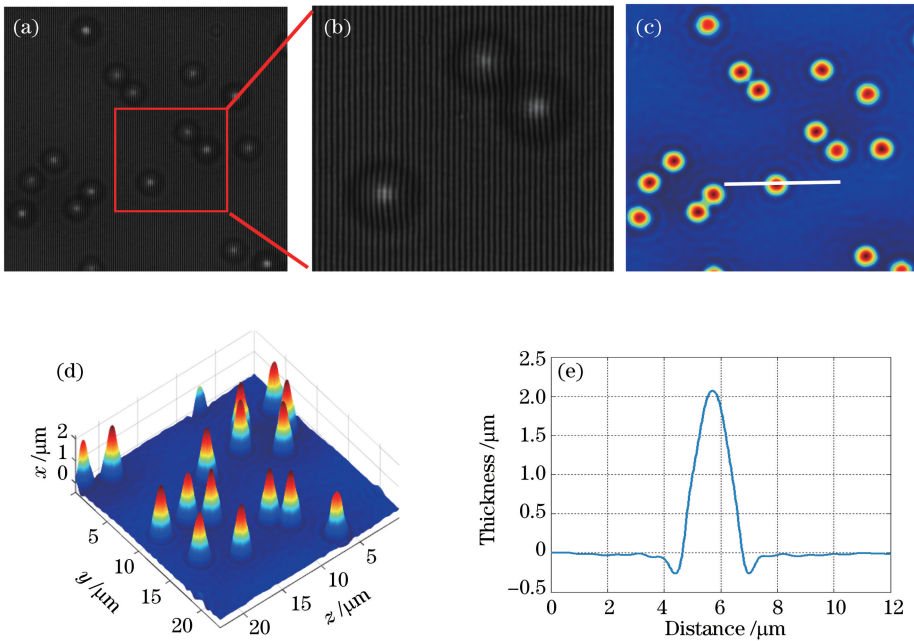


图 3 实验结果。(a)全息图;(b)矩形框中部分全息图的放大显示;(c)再现相位像;
(d)小球厚度三维形貌;(e) (c)中白色直线的微球厚度分布曲线

Fig. 3 Experimental results. (a) Hologram; (b) enlarged part of the hologram shown in the rectangle;
(c) reconstruction phase image; (d) three-dimensional thickness profile of the micro bead;
(e) thickness profile of the micro bead along the white line in (c)

保持所有参数不变,将物体移除,记录一张背景全息图,对这张全息图进行同样的处理,得到包裹展开的相位图。将两个包裹展开的相位图进行相减运算,得到相位像,如图 3(c)所示。

在微球这样的单一折射率样品中,光波的传播可认为是直线传播。因此,光经过微球的几何路径 $h(x, y)$ 和测量得到的相位分布 $\varphi(x, y)$ 之间的关系为 $h(x, y) = \lambda\varphi(x, y) / [2\pi(n - n_0)]$ 。已知微球折射率、浸没介质折射率和中心波长,利用测量得到的相位分布 $\varphi(x, y)$ 便可得到微球的厚度分布 $h(x, y)$,其厚度分布三维图如图 3(d)所示。图 3(e)是沿图 3(c)中所示过微球中心直线的微球厚度曲线,由最高点值得到微球直径为 $2.05 \mu\text{m}$ 。值得注意的是,该直径值是通过测量相位值计算得到的微球纵向直径,避免与横向测量得到的直径值混淆。测量了很多组微球样品,分析了 100 个微球的纵向直径,其值为 $(2 \pm 0.05) \mu\text{m}$ 。微球粒径分布范围为 $(2 \pm 0.05) \mu\text{m}$,这证实了组建的白光共路离轴数字全息显微系统具有准确的定量相位成像性能。

5 系统的时空噪声

本文也测量了系统的时空噪声,从而量化系统成像的时空敏感性。在定量相位成像中,常用的系统空间噪声、时间噪声定义如下^[19,27]。系统的空间噪声:不放置任何样品,直接测量得到的相位像有一定的随机分布值,根据相位和光程的关系可以得到没有样品时的随机光程分布,对该随机光程分布求均方差,该均方差值即表示空间噪声分布。系统的

时间噪声:不放置任何样品,连续测量得到多帧相位像,根据相位和光程的关系可以得到没有样品时的一系列随机光程分布,对每个像素的时间序列求均方差,得到每个像素点的时间噪声,再对所有像素点的时间噪声求均方差,得到的值即为系统的时间噪声。

在不放置样品的情况下,记录帧率为 $20 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$,记录 257 张全息图。实验证明此序列已达到时间稳态。每张全息图的像素数为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。将第一张全息图作为背景全息图,其展开相位分布为 $\varphi_0(x, y, 0)$ 。对其余每张全息图进行数值重建得到展开相位分布 $\varphi(x, y, t)$,将其与第一张的相位分布相减,以此得到 256 张相位图:

$$\delta\varphi(x, y, t) = \varphi(x, y, t) - \varphi(x, y, 0). \quad (12)$$

由于全息图是在不放置样品的条件下记录的,因此这 256 张相位图反映了系统的时空噪声。根据相位和光程的关系,可计算得到相应的 256 张光程分布图。图 4(a)是 256 张光程分布图中的任一张,显示了该时刻的噪声分布。图 4(b)是图 4(a)光程分布的直方图,其空间均方差 $\sigma_s = 0.6 \text{ nm}$,表示空间噪声为 0.6 nm 。图 4(c)是 256 张光程分布图所有像素的直方图,根据时间噪声的定义,先对每一像素时间序列求均方差,再对得到的所有像素的时间均方差求均方差,得到时间噪声 $\sigma_t = 0.04 \text{ nm}$ 。这两个值表明该系统具有非常低的噪声影响,也就是具有非常高的时空敏感性。通常表述为系统的空间敏感性为 0.6 nm ,时间敏感性为 0.04 nm 。

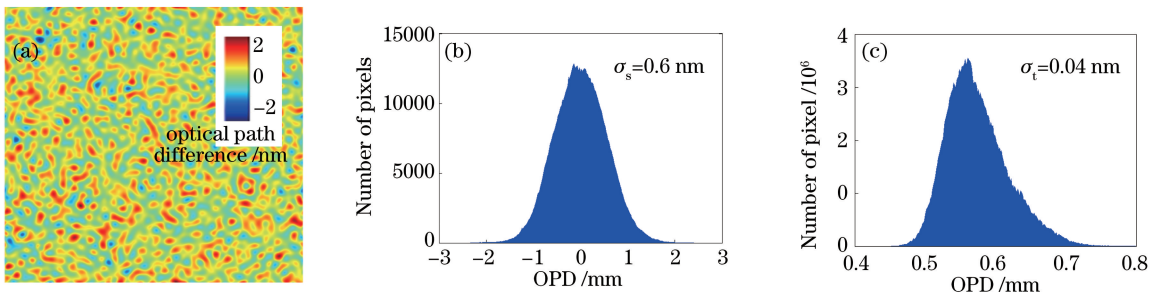


图 4 系统的时空噪声测量结果。(a)无样品时的光程分布;(b)空间噪声直方图;(c)时间噪声直方图

Fig. 4 Analysis of spatiotemporal noise of the system. (a) A optical path difference image of no-sample; (b) histogram of the spatial noise; (c) histogram of the temporal noise

6 结 论

在理论分析和参数计算的基础上构建了白光照明光栅衍射共路离轴数字全息显微成像系统,并对系统的成像准确度、时空噪声进行了反复测量。

实验结果表明,该系统能测量得到准确的定量相位像,比激光照明的参物光路分离的数字全息显微系统具有更高的时空敏感性。而且,由于该系统是白光照明,对生物样品完全无损,加之时间稳定性好,故该系统将非常适用于对生物样品的长时间观测。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Marquet P, Rappaz B, Magistretti P J, *et al.* Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(5): 468-470.
- [3] Min J W, Yao B L, Ketelhut S, *et al.* Simple and fast spectral domain algorithm for quantitative phase imaging of living cells with digital holographic microscopy [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 227-230.
- [4] Zhang J, Sun J, Chen Q, *et al.* Adaptive pixel-super-resolved lensfree in-line digital holography for wide-field on-chip microscopy [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 11777.
- [5] Ma L H, Wang H, Li Y, *et al.* Partition calculation for zero-order and conjugate image removal in digital in-line holography [J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1805-1815.
- [6] Ma L H, Wang H, Jin H Z, *et al.* Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0309002.
马利红, 王辉, 金洪震, 等. 数字全息显微定量相位成像的实验研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0309002.
- [7] Yuan C J, Feng S T, Nie S P. Digital holographic microscopy by using structured illumination [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0609003.
袁操今, 冯少彤, 聂守平. 基于结构光照明的数字全息显微术 [J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0609003.
- [8] Zeng Y N, Lu J S, Liu Y, *et al.* Particle tracking in three dimensional based on digital holographic microscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204001.
曾雅楠, 卢钧盛, 刘源, 等. 基于数字全息显微微粒三维位移跟踪测量技术 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1204001.
- [9] Ma L H, Li Y, Wang H, *et al.* Fast algorithm for reliability-guided phase unwrapping in digital holographic microscopy [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(36): 8800-8807.
- [10] Björn K, Stephan S, Christian R, *et al.* Characterisation of light emitting diodes (LEDs) for application in digital holographic microscopy for inspection of micro and nanostructured surfaces [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(7): 499-507.
- [11] Slabý T, Kolman P, Dostál Z, *et al.* Off-axis setup taking full advantage of incoherent illumination in coherence-controlled holographic microscope [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14747-14762.
- [12] Guo R L, Yao B L, Min J W, *et al.* LED-based digital holographic microscopy with slightly off-axis interferometry [J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(12): 125408.
- [13] Qin Y, Zhong J G. Theoretical and experimental research of digital holography with partially coherent light based on light-emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2236-2241.
秦怡, 钟金钢. 基于发光二极管的弱相干光数字全息理论与实验研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2236-2241.
- [14] Mico V, Zalevsky Z, García J. Common-path phase-shifting digital holographic microscopy: a way to quantitative phase imaging and superresolution [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(17): 4273-4281.
- [15] Anand A, Vora P, Mahajan S, *et al.* Compact, common path quantitative phase microscopic techniques for imaging cell dynamics [J]. *Pramana*, 2014, 82(1): 71-78.
- [16] Ma C J, Li Y, Zhang J W, *et al.* Lateral shearing common-path digital holographic microscopy based on a slightly trapezoid Sagnac interferometer [J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13659-13667.
- [17] Finkeldey M, Göring L, Brenner C, *et al.* Depth-filtering in common-path digital holographic microscopy [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19398-19407.
- [18] Mahajan S, Trivedi V, Vora P, *et al.* Highly stable digital holographic microscope using Sagnac interferometer [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3743-3746.
- [19] Bhaduri B, Pham H, Mir M, *et al.* Diffraction phase microscopy with white light [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1094-1096.
- [20] Nguyen T H, Edwards C, Popescu G, *et al.* Quantitative phase imaging of weakly scattering objects using partially coherent illumination [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 11683-11693.
- [21] Shan M G, Mikhai K E, Majeed H, *et al.* White-light diffraction phase microscopy at doubled space-bandwidth product [J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 29033-29039.
- [22] Nguyen T H, Kandel M, Shakir H M, *et al.* Halo-free phase contrast microscopy [J]. *Scientific*

- Reports, 2017, 7: 44034.
- [23] Ma L H, Rajshekhar G, Wang R, *et al.* Phase correlation imaging of unlabeled cell dynamics [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 32702.
- [24] Edwards C, Bhaduri B, Nguyen T, *et al.* Effects of spatial coherence in diffraction phase microscopy [J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5133-5146.
- [25] Arines J. Least-squares modal estimation of wrapped phases: application to phase unwrapping [J]. Applied Optics, 2003, 42(17): 3373-3378.
- [26] Colomb T, Cuche E, Charrière F, *et al.* Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation [J]. Applied Optics, 2006, 45(5): 851-863.
- [27] Edwards C, Bhaduri B, Griffin B G, *et al.* Epillumination diffraction phase microscopy with white light [J]. Optics Letters, 2014, 39(21): 6162-6165.