

菲涅耳非相干数字全息大视场研究

汤明玉 武梦婷 臧瑞环 荣腾达 杜艳丽 马凤英 段智勇 弓巧侠

Fresnel incoherent digital holography with large field-of-view

Tang Ming-Yu Wu Meng-Ting Zang Rui-Huan Rong Teng-Da Du Yan-Li Ma Feng-Ying Duan Zhi-Yong Gong Qiao-Xia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 104204 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182216

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182216>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于空间光调制器的非相干数字全息单次曝光研究

Single-shot incoherent digital holography based on spatial light modulator

物理学报. 2018, 67(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172127>

图像传感器像素化效应对菲涅耳非相干关联全息分辨率的影响

Influence of pixelation effect of image sensor on resolution of Fresnel incoherent correlation holography

物理学报. 2019, 68(6): 064203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181844>

基于位相变更的非相干数字全息自适应成像

Adaptive imaging by incoherent digital holography based on phase change

物理学报. 2018, 67(4): 044202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172202>

基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统设计

Design of monocentric wide field-of-view and high-resolution computational imaging system

物理学报. 2019, 68(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182229>

基于螺旋相位调制的非相干全息点扩散函数研究

Point spread function of incoherent digital holography based on spiral phase modulation

物理学报. 2018, 67(1): 014203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171442>

菲涅耳非相干数字全息大视场研究*

汤明玉 武梦婷 臧瑞环 荣腾达 杜艳丽
马凤英 段智勇 弓巧侠†

(郑州大学物理工程学院, 郑州 450001)

(2018年12月17日收到; 2019年2月19日收到修改稿)

菲涅耳非相干相关全息术 (Fresnel incoherent correlation holography, FINCH) 通过空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 将来自物点的光波分解为曲率半径不同的两束自相干光, 干涉条纹由 CCD 记录. 由于受限于 SLM 与 CCD 的像素数目及像素尺寸, FINCH 技术与光学全息术相比记录视场要小得多. 本文通过对 FINCH 系统的记录过程进行理论分析, 给出了 SLM 所能记录的视场角, 说明通过调控加载在 SLM 上的双透镜光轴中心, 能够扩大 SLM 的有效直径从而将 SLM 的有效记录范围增大 2.77 倍, 有效扩大了系统的记录视场. 搭建了非相干光反射式数字全息记录系统并对理论分析进行了实验验证, 结果表明: 在 SLM 上依次加载不同光轴中心位置的双透镜掩模进行 FINCH 记录及再现, 将得到的各子图像拼接融合可以得到高分辨率大视场图像, 为菲涅耳非相干全息术在高分辨大视场显微成像的进一步应用提供了有力支撑.

关键词: 非相干数字全息术, 空间光调制器, 成像视场, 视场拼接

PACS: 42.40.-i, 42.40.Ht

DOI: 10.7498/aps.68.20182216

1 引言

全息术通过干涉记录物体的振幅和相位信息, 利用衍射原理重现出物体的三维形状, 实现了真正意义上的三维 (3D) 成像^[1-4]. 近年来, 随着计算机、高分辨率电荷耦合器和空间光调制器的进步, 数字全息术得到迅速发展, 非相干全息术的提出突破了全息记录必须使用相干光照明的局限, 发挥了独特的优势, 其中 Brooker 和 Rosen^[5] 提出的菲涅耳非相干相关全息术 (FINCH) 受到人们的广泛关注^[6-12]. FINCH 技术记录过程中无需扫描、移动任何光学器件, 可以快速获取物体的三维信息, 实现了共路同轴的非相干数字全息记录, 相比于传统的非相干成像系统具有更高的分辨率和稳定性, 成

为非相干数字全息术中最为重要的一个研究方向. FINCH 技术研究主要集中在三个方面^[13-19]: 1) FINCH 成像机理研究, 并利用各种技术如合成孔径技术进一步提高 FINCH 成像分辨率; 2) FINCH 技术再现算法研究, 主要目的是提高再现像质量; 3) FINCH 技术应用研究, 利用 FINCH 系统实现荧光显微成像、层析成像、共聚焦显微成像等, 而提高 FINCH 成像的视场一直未受到大家关注.

人们通过不同方法与技术提高数字全息记录视场. 吴永丽等^[20] 利用波长复用、偏振复用和角分复用技术, 将数字全息记录视场增大将近四倍. Kim 等^[21] 通过合成孔径技术提高数字全息视场. Tahara 等^[22] 采用角度复用和空间带宽增强的数字全息方法, 有效扩展了记录视场. 但这些方法实验系统复杂, 操作繁琐, 不利于实际应用. 本文首

* 国家自然科学基金 (批准号: 51175479, U1704155)、河南省高等学校重点科研项目 (批准号: 16A140035, 18A140032) 和河南省高校科技创新团队 (批准号: 18IRTSTHN016) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gqx1205@zzu.edu.cn

次提出了一种基于 SLM 提高 FINCH 记录视场的方法, 在保持 FINCH 成像高分辨的同时能够有效扩大系统的成像视场. 且整个成像系统结构简单、操作便利, 记录过程中只需通过计算机更换加载在 SLM 上的掩模, 从而调控成像系统光源的位置, 最后获得几幅有一定重叠的子图像, 将子图像拼接成为整幅大视场图像, 实现了 FINCH 系统的高分辨率大视场成像.

2 FINCH 大视场成像原理

图 1 所示为 FINCH 系统成像原理示意图, 系统主要由准直透镜、SLM 以及 CCD 组成, 并采用非相干光照明. 由物点发出的球面波经准直透镜后传播至 SLM 上, SLM 上加载双透镜模式, 如图 2(d) 所示掩模, 透镜光轴在 SLM 幅面的中心, 透镜焦距分别为 f_{d1} , f_{d2} , 将来自物点的光波分割成两束曲

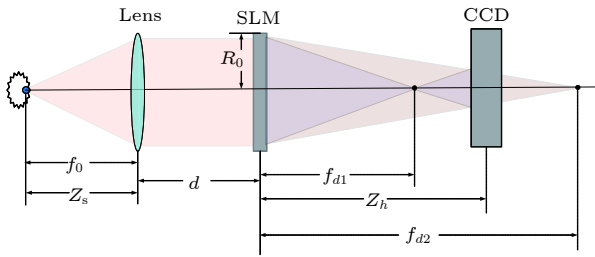


图 1 FINCH 系统成像原理图

Fig. 1. Schematic diagram of FINCH imaging system.

率半径不同的自相干光, 最后由 CCD 完成记录. 由于 CCD 和 SLM 的直径一般只有几毫米, 尺寸远小于系统中其他光学元件 (如透镜直径为几十毫米), 因此与光学全息成像系统相比, FINCH 成像系统视场较小, 最适用于显微成像方面.

根据 Rosen 等^[15]对 FINCH 成像过程的理论分析, CCD 上能记录的通过 SLM 两束自相干光的最大重合半径即为 SLM 半径. 图 2 为 FINCH 大视场成像原理图, 根据视场角定义, SLM 所能记录的光束范围如图 2(a) 所示, SLM 直径以 \overline{ab} 表示, 当加载图 2(d) 掩模时, 其所能记录的视场角大小为 2ω , 即:

$$\tan \omega = \frac{\overline{ac}}{\overline{oc}}, \quad (1)$$

其中 \overline{oc} 为物体与 SLM 的距离. 根据 (1) 式可以得知, 为获得高分辨率大视场成像, 需要增大 SLM 的幅面. 本文选用反射式 SLM (德国 Holoeye, PLUTO-VIS, 像素数为 1920×1080 , 像素尺寸为 $8 \mu\text{m}$). 通过计算机编程移动 SLM 上加载双透镜的中心, 即移动成像系统光轴的位置, 使 SLM 与物体产生相对移动, 加载如图 2(e) 所示掩模时, 使光源的相对位置由图 2(d) 中的 c 点移至图 2(e) 中的 c' 点时, SLM 记录的视场角为 ω' , 即:

$$\tan \omega' = \frac{\overline{ac'}}{\overline{oc'}}. \quad (2)$$

物体离 SLM 的距离远大于物体本身, 可以认为

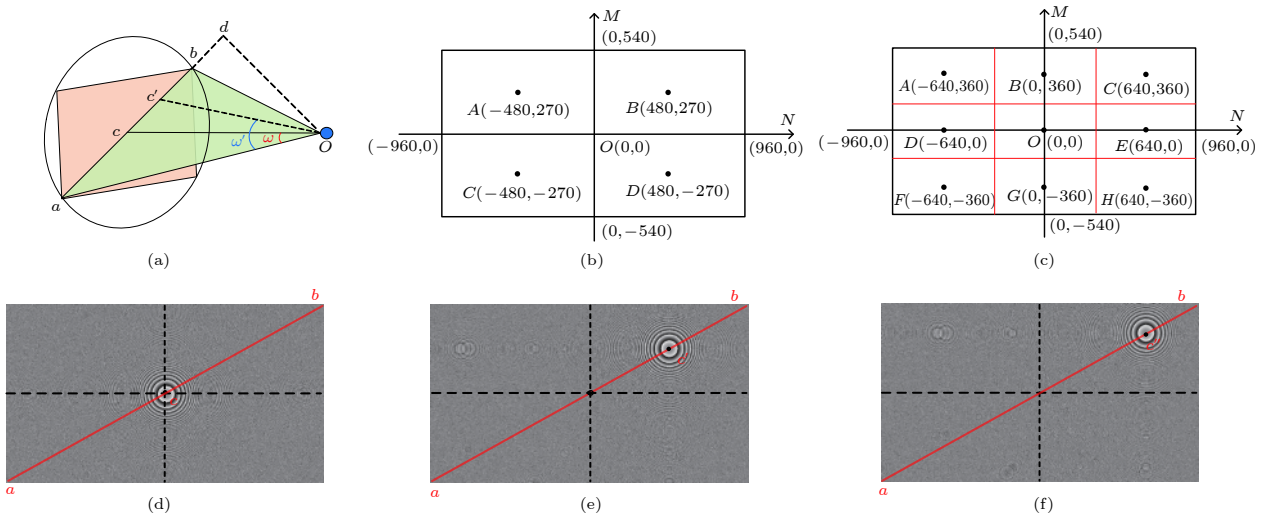


图 2 FINCH 大视场成像原理图 (a) SLM 记录视场角; (b) 四次记录光轴中心位置; (c) 九次记录光轴中心位置; (d) 光轴中心处于图 (b) 中 O 点时的掩模; (e) 光轴中心处于图 (b) 中 B 点时的掩模; (f) 光轴中心处于图 (c) 中 C 点时的掩模

Fig. 2. Schematic diagrams of FINCH with large field-of-view imaging: (a) The recording field-of-view angle of SLM; (b) the central position of the optical axis for recording four times; (c) central position of optical axis for recording nine times; (d) optical axis center is at point O of (b); (e) optical axis center is at point B of (b); (f) optical axis center is at point C of (c).



图 3 双透镜光轴中心处于四个不同位置的掩模

Fig. 3. The masks with the center of dual-lens optical axis in four different positions.

$\overline{oc'} \approx \overline{oc}$, 由图 2(d) 和图 2(e) 可以看出 $\overline{ac'} = 1.5\overline{ac}$, 所以

$$\frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = 1.5. \quad (3)$$

在整个记录过程, 将 SLM 上加载的双透镜掩模按照图 2(b) 所示方式依次更换光轴中心的位置 (掩模如图 3 所示), 分别进行 FINCH 记录, 并将各视场的子图像拼接融合获得大视场图像. 结合 (2) 式和 (3) 式, 可以计算出 SLM 的有效记录范围增大至原来的 2.25 倍. 如果按照图 2(c) 所示方式改变掩模双透镜光轴中心的位置 (如图 2(f) 所示), 当图 2(d) 中的 c 点移至图 2(f) 中的 c' 点时, 同理可以计算出 SLM 的有效记录范围增大至最初的 2.77 倍. 假若将 SLM 幅面划分得更多, 双透镜光轴中心将继续向边缘移动, 最大会移动至 SLM 的最边缘, 此时 SLM 的有效记录面积达到最大, 为原来的 4 倍. 但划分的区域越多, FINCH 记录的次数越多, 成像速度会大大降低.

采用上述方法增大视场并不会影响整个系统的分辨率, FINCH 成像系统的强度点扩散函数 (PSF) 宽度决定了系统的分辨率, 在像平面上 PSF 的宽度为 [13]:

$$\Delta = \frac{1.22\lambda z_r}{R_H}, \quad (4)$$

其中 λ 为入射光波长, z_r 为再现距离, R_H 为经过 SLM 分光后的两个球面波在 CCD 表面的重合半径. 当给 SLM 更换不同掩模时, 并不会改变 (4) 式中几个参数的值, 即 PSF 的宽度不变. 所以, 采用上述方式在 SLM 上加载掩模, 可以在保证高分辨率的同时有效扩展 FINCH 系统的记录视场.

3 实验系统

本实验搭建的是如图 4 所示的非相干光反射式数字全息记录系统, 采用连续的白光光谱光源 (CLE-TCX250,250W), 会聚透镜 L_1 焦距为 60 mm, 滤光片 (BF) 的带宽为 20 nm, 中心波长为 632.8 nm, BS_1 , BS_2 为分束器, USAF 1951 分辨率板为待测样品, Polarizer 为偏振片, 其偏振方向与 SLM 的液晶长轴方向一致, 准直透镜 L_2 的焦距为 250 mm, SLM 像素数为 1920×1080 , 像素尺寸为 $8 \mu\text{m}$, CCD 像素大小为 $4.54 \mu\text{m}$, 像素数为 2750×2200 , 拍摄时实际所用像素数为 2048×2048 . 待测物体与 L_2 之间的距离为 250 mm, L_2 与 SLM 之间的距离为 140 mm, SLM 到 BS_2 与 BS_2 到 CCD 的距离之和为 250 mm.

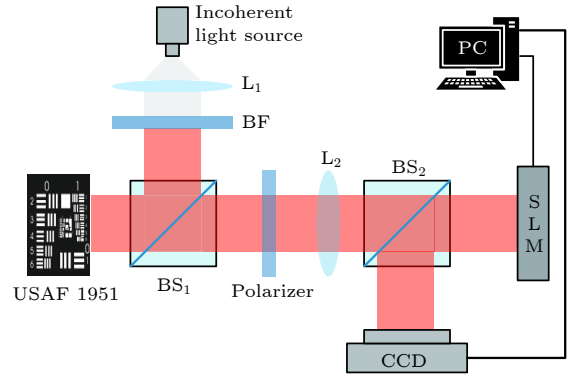


图 4 非相干光反射式数字全息实验光路

Fig. 4. Experimental set-up of incoherent light reflection digital holography.

实验记录过程中只需通过计算机给 SLM 依次更换不同光轴中心的相位掩模, 记录各视场的相移全息图.

4 实验结果与分析

采用图 4 所示非相干光反射式数字全息记录系统进行实验探究, 分别在 SLM 上依次加载图 3 中的掩模, CCD 记录下 USAF 1951 分辨率板不同视场的全息图, 利用角谱衍射法将全息图重建, 得到如图 5(a)—图 5(d) 所示的子图像. 利用 Matlab 软件将各子图像拼接处理得到如图 5(f) 所示的大视场图像, 图 5(e) 为常规 FINCH 记录得到的再现像, 可以看出, 图 5(f) 的视场范围明显大于图 5(e),

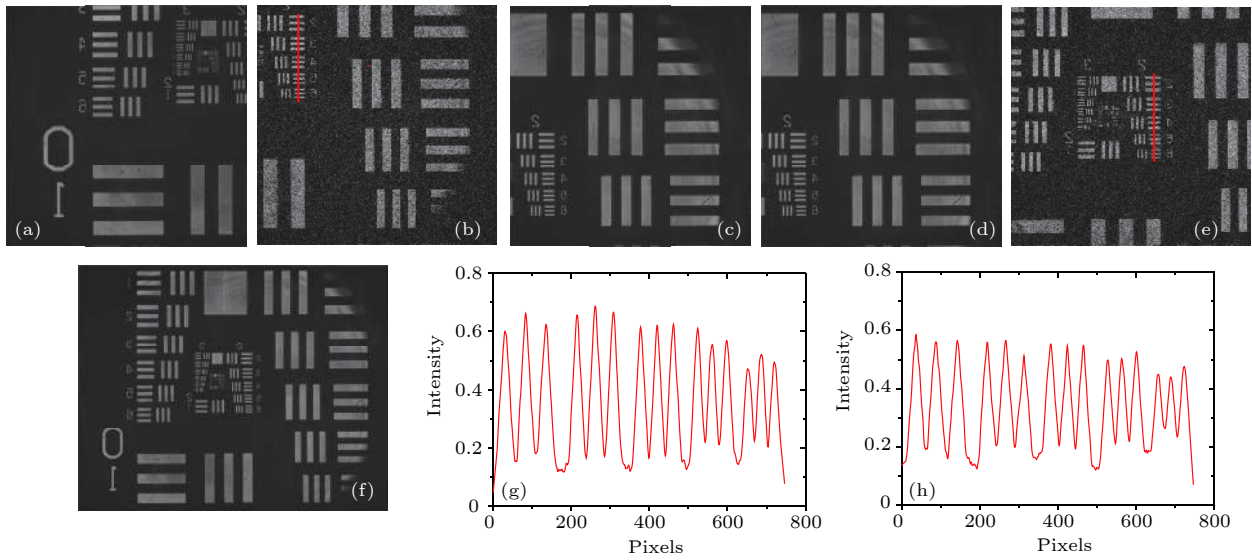


图 5 USAF1951 分辨率板重建像 (a)—(d) 分别为加载图 3 中掩模所得; (e) 常规再现像; (f) 大视场图像; (g) 为 (b) 红线处的强度分布曲线图; (h) 为 (e) 红线处的强度分布曲线

Fig. 5. Reconstruction images of USAF1951 resolution plate: (a)–(d) are mounted with Fig. 3 (d) masks, respectively; (e) normal reconstruction images; (f) large field-of-view images; (g) the intensity distribution at the position of the red line of (b); (h) the intensity distribution at the position of the red line of (e).

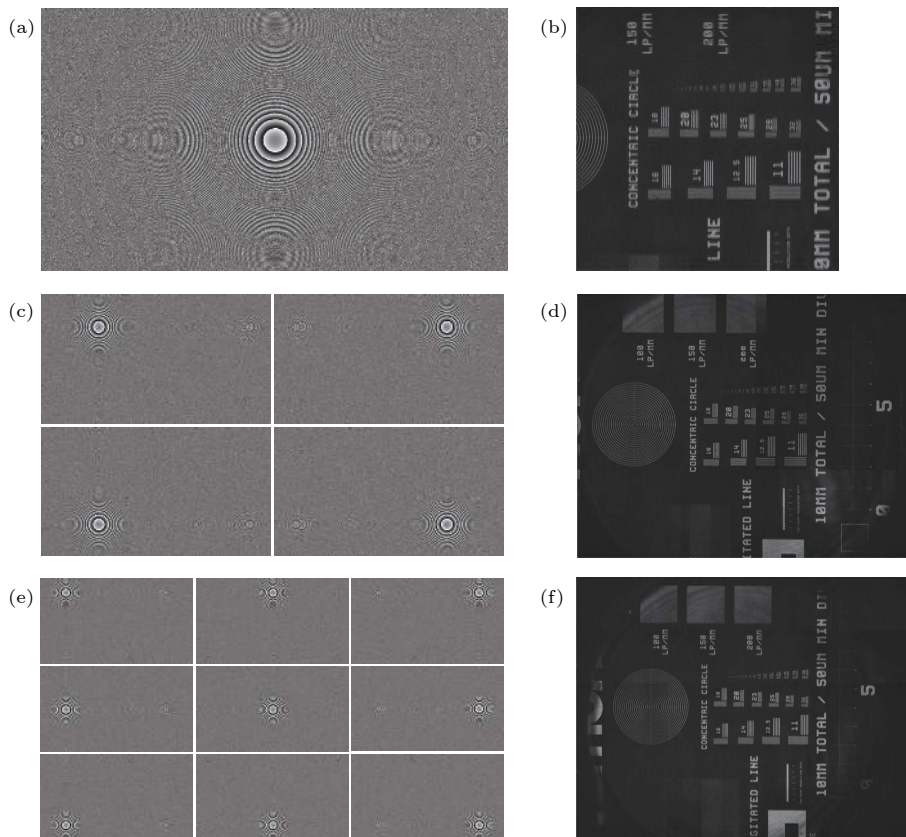


图 6 R1L3S5P 分辨率板重建像 (a) 常规掩模; (b) 常规再现像; (c) 四次记录掩模; (d) 由四个子图像拼接得到的大视场图像; (e) 九次记录掩模; (f) 由九个子图像拼接得到的大视场图像

Fig. 6. Reconstruction images of R1L3S5P resolution plate: (a) Conventional mask; (b) conventional reconstruction image; (c) masks of four records; (d) large field-of-view images obtained by splicing four sub-images; (e) masks of nine records; (f) large field-of-view images obtained from nine sub-images.

所以采用本研究方法可以增大系统的记录视场. 为了能够进一步说明增大成像视场的同时没有影响分辨率, 绘制了图 5(b) 和图 5(e) 红线处的强度分布曲线图, 分别为图 5(g) 和图 5(h), 观察图 5(g) 和图 5(h) 可知, 当加载设计的大视场掩模时所获得的重建像质量较高, 噪声没有增加, 并且峰值没有下降, 红色曲线分布也比较均匀, 更加有力地说明了本实验方法可以同时实现高分辨率大视场成像.

另外, 我们对本文所提出的菲涅耳非相干数字全息大视场方法进行了更深一步的实验研究, 以 R1L3S5P 分辨率板作为记录物体, 结果如图 6 所示. 实验中, 首先在 SLM 上加载如图 6(a) 所示掩模记录物体的全息图, 经过三步相移线性处理后采用角谱法再现, 获得的重建像如图 6(b) 所示; 其次在 SLM 上依次更换如图 6(c) 中不同光轴中心的掩模, 将记录的四幅子图像进行再现、拼接处理后得到如图 6(d) 所示的大视场图像; 最后以相同的方法给 SLM 依次加载如图 6(e) 中的各个掩模, 最后得到九个不同视场下的重建像, 经过拼接处理后得到如图 6(f) 所示大视场图像. 比较图 6(b) 和图 6(d) 可以发现前者在视场边缘周围没有记录到的信息在后者中被记录下来, 后者的视场信息完全包含了前者, 大大扩增了前者四周的视场; 观察图 6(d) 和图 6(f) 可以看到图 6(f) 所记录的视场范围相对于图 6(d) 中的视场有了进一步增大. 实验结果表明当将加载在 SLM 上掩模的光轴中心向边缘移动时可以有效扩大系统的记录视场, 充分证实了本研究方法通过增大 SLM 的有效直径实现了 FINCH 系统的大视场高分辨成像. 当然, 随着 SLM 上光轴记录中心的增多, 成像速度会降低, 对于四个光轴中心利用三步相移技术只需要拍摄 12 次, 如果是九个光轴中心将要拍摄 27 次, 如果将光轴中心进一步向边缘移动, 则记录时间会大大增加.

5 结 论

随着光电成像技术的发展, 为了获取更大空间范围及更多空间细节的目标图像信息, 光学系统逐步向大视场和高分辨率的方向发展, FINCH 技术在全息显微成像方面表现突出, 但由于成像视场较小限制了该技术的应用范围, 本文对扩大 FINCH

系统的记录视场进行了理论分析和实验研究. 首先设计了不同光轴中心位置的掩模, 并使光轴中心逐步向边缘移动从而增大 SLM 的有效直径, 然后将几种掩模分别加载在 SLM 上进行全息记录, 最终获得了不同视场范围的重建像, 比较分析实验结果发现, 将掩模的光轴中心向边缘移动可以有效增加系统的记录视场. 而且本研究方法不需要复杂的成像装置, 只是通过计算机更换 SLM 上加载的掩模便可记录不同视场下的全息图, 操作简便快捷, 并且兼顾了高分辨率和大视场成像, 为 FINCH 系统的大视场成像提供了实验支撑, 拓宽了该技术的应用范围.

参考文献

- [1] Gabor D 1948 *Nature* **161** 777
- [2] Dubois F, Joannes L, Legros J C 1999 *Appl. Opt.* **38** 7085
- [3] Pedrini G, Tiziani H J 2002 *Appl. Opt.* **41** 4489
- [4] Lingfeng Yu, Myung K, Kim 2005 *Opt. Lett.* **30** 2092
- [5] Brooker G, Rosen J 2007 *Opt. Lett.* **32** 912
- [6] Kim, Myung K 2012 *Opt. Lett.* **37** 2694
- [7] Xu T X, He J R, Ren H, Zhao Z C, Ma G Q, Gong Q X, Yang S N, Dong L, Ma F Y 2017 *Opt. Express* **25** 29207
- [8] Man T L, Wan Y H, Chen H, Jiang Z Q, Jiang Z Q 2012 *Opt. Eng.* **51** 055601
- [9] Bai Y H, Zang R H, Wang P, Ma F Y, Du Y L, Duan Z Y, Gong Q X 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 064202 (in Chinese) [白云鹤, 臧瑞环, 汪盼, 荣腾达, 马凤英, 杜艳丽, 段智勇, 弓巧侠 2018 *物理学报* **67** 064202]
- [10] Kashter Y, Vijayakumar A, Miyamoto Y, Rosen J 2016 *Opt. Lett.* **41** 1588
- [11] Liu Y C, Lu X X, Tao T, Zhang D S, Deng J, Wang H K, Zhang Z, Zhong L Y 2013 *Asia Communications and Photon Conference* Guangzhou, China, November 7-10, 2013 p14
- [12] Zhao Z C, Yang X F, Xu T X, He J R, Gong Q X, Du Y L, Dong L, Yuan B, Ma F Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 014203 (in Chinese) [赵忠超, 杨旭锋, 许天旭, 何九如, 弓巧侠, 杜艳丽, 董林, 袁斌, 马凤英 2018 *物理学报* **67** 014203]
- [13] Brooker G, Siegel N, Wang V, Rosen J 2011 *Opt. Express* **19** 5047
- [14] Katz B, Rosen J, Kelner R, Brooker G 2012 *Opt. Express* **20** 9109
- [15] Rosen J, Siegel N, Brooker G 2011 *Opt. Express* **19** 26249
- [16] Siegel N, Storrie B, Bruce M, Brooker G 2015 *Opt. Eng.* **54** 013101
- [17] Yanagawa T, Abe R, Hayasaki Y 2015 *Opt. Lett.* **40** 3312
- [18] Kashter Y, Rosen J 2014 *Opt. Express* **22** 20551
- [19] Bang L T, Wu H Y, Zhao Y, Kim E G, Kim N 2016 *J. Microsc.* **265** 372
- [20] Wu Y L, Yang Y, Zhai H C, Ma Z H, Gai Q, Deng L J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084203 (in Chinese) [吴永丽, 杨勇, 翟宏琛, 马忠洪, 盖琦, 邓丽军 2013 *物理学报* **62** 084203]
- [21] Kim S, Im Y, Hahn J 2014 *Opt. Eng.* **53** 060601
- [22] Tahara T, Takahashi Y, Komura T, Kaku T, Arai Y 2015 *J. Disp. Technol.* **11** 807

Fresnel incoherent digital holography with large field-of-view*

Tang Ming-Yu Wu Meng-Ting Zang Rui-Huan Rong Teng-Da Du Yan-Li
Ma Feng-Ying Duan Zhi-Yong Gong Qiao-Xia[†]

(School of Physics Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(Received 17 December 2018; revised manuscript received 19 February 2019)

Abstract

Incoherent digital holography (IDH) is a recently proposed technique to record three-dimensional (3D) information about the object under incoherent illumination, which breaks the limitation that the holographic recording must be illuminated by coherent light sources and thus makes it usable in white-light and fluorescence illuminating circumstance. In particular, the fresnel incoherent correlation holography (FINCH) is an exemplary method which improves the imaging resolution power and efficiency of incoherent digital holography, and it can obtain 3D distribution of objects swiftly without scanning and moving. However, compared with the conventional optical holography, the FINCH system has a very small field-of-view due to the limitation of the pixel number and size of spatial light modulator (SLM). Therefore, expanding the recording field-of-view of FINCH system is very significant for the application of IDH. In the FINCH, the SLM is used as a diffractive beam splitter so that each spherical beam, originating from each object point, is split into two spherical beams with two different curve radii. Then the interference fringes between the two beams are recorded by CCD. In this paper, the field-of-view angle recorded by the SLM is proposed and analyzed based on the physical and numerical principles of the FINCH system. The field-of-view of imaging system is improved by increasing the effective diameter of SLM through moving the center of the dual-lens optical axis mounted on the SLM to the edge in different directions respectively. An optical setup of reflection mode is constructed to verify the theoretical analysis of this study, and the sub-holograms in different field-of-views are obtained by CCD through changing the masks displayed on the SLM sequentially. Then, the complex holograms in different field-of-views are obtained by using the three-step phase-shifting method, and the reconstructed images are acquired respectively through the angular spectrum method (ASM) by using a computer. Finally, the large field-of-view image is obtained by stitching the reconstructed images in each field-of-view by utilizing the matlab program. The experimental results show that the efficient recording field-of-view of SLM can be increased by 2.77 times with our proposed method. Accordingly, the recording field-of-view of the system is improved significantly. The recording field-of-view of the FINCH system will increase further if the center of the dual-lens optical axis continues to move toward the edge. Therefore, this study provides an important support for the further application of high resolution microscopic imaging with large field-of-view.

Keywords: incoherent digital holography, spatial light modulator, imaging field-of-view, field-of-view splicing

PACS: 42.40.-i, 42.40.Ht

DOI: 10.7498/aps.68.20182216

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51175479, U1704155), the Key Scientific Research Projects of the Higher Education Institutions of Henan Province, China (Grant Nos. 16A140035, 18A140032), and the Science and Technology Innovation Team in Colleges and Universities of Henan Province, China (Grant No. 18IRTSTHN016).

[†] Corresponding author. E-mail: gqx1205@zzu.edu.cn