

物光复合调制的数字全息散斑去噪方法

王春阳 孔勇 李欢 吴虎 张贺 王梦

Digital holographic speckle denoising method based on compound modulation of object light

WANG Chunyang, KONG Yong, LI Huan, WU Hu, ZHANG He, WANG Meng

引用本文:

王春阳, 孔勇, 李欢, 等. 物光复合调制的数字全息散斑去噪方法[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 275–285. DOI: 10.5768/JAO202344.0201006

WANG Chunyang, KONG Yong, LI Huan, et al. Digital holographic speckle denoising method based on compound modulation of object light[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 275–285. DOI: 10.5768/JAO202344.0201006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0201006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

偏振相移与相位共轭结合的散射光聚焦技术研究

Focusing of scattering light by combining polarization phase shifting and digital optical phase conjugation

应用光学. 2019, 40(1): 63–67 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101011>

油雾扩散过程中浓度对偏振激光传输特性的影响

Effect of concentration on propagation characteristics of polarized laser in oil-mist diffusion

应用光学. 2017, 38(6): 1012–1017 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0607002>

基于湍流模型的自适应光学系统响应矩阵测量方法

Measurement method of response matrix for adaptive optics systems based on turbulence model

应用光学. 2017, 38(6): 963–967 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0603004>

基于离轴数字全息改善散斑自相关重建效果

Improving effect of speckle autocorrelation reconstruction based on off-axis digital holography

应用光学. 2021, 42(2): 262–267 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0202002>

基于相控阵雷达模型的液晶光束偏转波控方法研究

Liquid-crystal beam deflection wave control method based on phased array radar

应用光学. 2017, 38(4): 581–586 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0402001>

基于物体像的干涉条纹图像中散斑噪声的识别方法

Recognition method of speckle noise in interference fringe images based on object

应用光学. 2017, 38(2): 221–226 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0202003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0275-11

物光复合调制的数字全息散斑去噪方法

王春阳, 孔 勇, 李 欢, 吴 虎, 张 贺, 王 梦

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘 要: 为了克服在数字全息术中激光源高相干度造成的散斑噪声降低成像质量问题, 论文提出将石英退偏器与电控液晶散射片相结合用于数字全息术中。通过在物光路中加入一个石英退偏器, 利用退偏器的退偏性能使物光光路中的线偏光变成随机偏振光, 降低与参考光的相干程度, 实现对散斑噪声的抑制; 通过给液晶散射片外加电场可以引起液晶分子的运动和光轴取向改变, 调整液晶驱动电压大小来改变入射光的不同散射效果, 有效地降低了光源的相干性; 分别将单独采用石英退偏器和电控液晶散射片的重建图像与组合装置的重建图像进行对比分析, 通过实验验证了所提方法的有效性。实验结果表明: 两种实验对象在组合装置下的重建像峰值信噪比分别达到 16.91 和 18.30, 结构相似度为 0.47 和 0.43, 等效视数较原始重建像提高了 42% 和 30%, 散斑指数为 1.52 和 1.29。论文提出的方法可较好地去除散斑噪声, 保留更多的图像细节部分。

关键词: 数字全息; 噪声抑制; 液晶; 退偏器; 偏振态

中图分类号: O438.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0201006

Digital holographic speckle denoising method based on compound modulation of object light

WANG Chunyang, KONG Yong, LI Huan, WU Hu, ZHANG He, WANG Meng

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In digital holography, the speckle noise caused by the high coherence of laser source will reduce the imaging quality. In order to overcome this problem, the combination of a quartz depolarizer and an electronically controlled liquid crystal diffuser for digital holography was proposed. By adding a quartz depolarizer to the object light path, the depolarization performance of the depolarizer was used to make the linearly polarized light in the object light path into randomly polarized light, which reduced the degree of coherence with the reference light and realized the suppression of speckle noise. By applying an electric field to the liquid crystal diffuser, the movement of the liquid crystal molecules and the orientation change of the optical axis could be caused. The liquid crystal driving voltage could be adjusted to change the different scattering effects on the incident light, thereby effectively reducing the coherence of the light source. The reconstructed images using the quartz depolarizer and the electronically controlled liquid crystal diffuser were compared and analyzed respectively with the reconstructed images of the combined device. The effectiveness of the proposed method was verified by experiments. The experimental results show that the peak signal to noise ratio of the reconstructed images of two experimental objects under the combined device reaches 16.91 and 18.30, the structural similarity is 0.47 and 0.43, the equivalent number of looks is 42% and 30% higher

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-07-11

基金项目: 上海市自然科学基金 (19ZR1421700)

作者简介: 王春阳 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事数字全息技术研究。E-mail: 1468675925@qq.com

通信作者: 孔勇 (1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感及数字全息技术研究。E-mail: kky7757@aliyun.com

than the original reconstructed image, and the speckle index is 1.52 and 1.29, respectively. The proposed method can better remove the speckle noises and retain more details of the image.

Key words: digital holography; noise suppression; liquid crystal; depolarizer; polarization state

引言

随着数字全息技术的不断成熟,数字全息拍摄的激光图像在医学影像领域^[1-2]、光学安全与加密^[3-4]、压缩全息成像^[5]、无损检测^[6]等多个领域广泛使用。但是,由于数字全息系统中的激光源具有高相干度,在记录图像中会形成散斑噪声^[7-8],这些散斑噪声会被传播到重建像中,影响三维重建的准确性,因此,很多学者已开始研究通过各种方法去除数字全息技术中的噪声影响。

这些方法大致可以分成三类。第一种方法是通过降低光源的相干性来抑制散斑噪声,如 Kemper 等采用具有短相干长度的发光二极管(light emitting diode, LED)或者超辐射发光二极管(superluminescent diode, SLD)作为光源来得到低噪声水平的重建像^[9],这种方法对系统中物参光的光程差要求十分严格,并且成像质量不高;在全息系统中放置旋转毛玻璃片^[10-11]降低光源的相干性,会增加光学实验装置的复杂性,时间响应较慢。第二种方法是多幅散斑全息图叠加平均法,利用照明角度多样化、波长多样化、偏振态多样化等方法来记录一系列全息图^[12-14],使用多幅全息图进行叠加平均去噪,这种方法对光路结构有着严格要求且记录过程复杂。第三种方法是数字图像处理方法,通过诸如中值滤波^[15]和均值滤波^[16]的去噪算法减少散斑噪声,还有像带孔径函数的维纳滤波^[17],小波滤波^[18],二维经验模式分解^[19],以及基于偏微分方程的同态滤波^[20]。为合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像开发的 Lee 滤波算法^[21]也已应用于减少数字全息术中散斑噪声。这类方法的优势是,不需要任何额外硬件支持,因此其成本较低。但是,由于数字全息图像并不完全等同于一般的图像,使用这些图像滤波方法容易损坏全息图的高频信息。比如, Lee 滤波的推导基础是一种乘性模型,全息干涉图中既包含乘性噪声,也有加性噪声,对噪声的静态假设不准确就会造成去噪效果不稳定;进行均值滤波和小波阈值滤波^[22]操作时也会造成信息丢失,因为这两种算法处理图像噪声和细节信息时不加以区分。为了更好地平衡噪声去除和图像边缘细节保持,近年来提出了一种非局部均值算法^[23],随后提出一种被称为块

匹配 3D 算法(lock matching and 3D filtering, BM3D)的改进版本^[24],这两种算法都被用来抑制数字全息术中的散斑噪声,但是需要具有高信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)的重建强度图像。由于数字全息术中存在严重散斑噪声,再现的强度图像的 SNR 通常不高,所以在单个重建强度图像上直接使用上述算法仍然是一个挑战。

本文首次提出将石英空域退偏器和电控液晶散射片两种装置组合用于数字全息术中,通过在物光侧加入石英退偏器与电控液晶散射片,对物光束进行复合调制,从而抑制散斑噪声。本文提出的组合方法具有结构简单、易于控制、可以快速响应达到实时性的优点。文中对多种情况下记录的重建图做了相关分析,与单一装置方法重建结果相比,本文方法对全息重建图像中的散斑噪声起到了良好的抑制效果,并且保留了更完整的细节信息。

1 理论

1.1 散斑成因分析

数字全息术记录的全息图往往存在着许多散斑噪声,这是因为全息记录的对象通常表面粗糙,高相干度的激光光束照射在物体表面产生散射,粗糙表面各点可以看作无数的随机反射元,即相当于在原始观察光场中添加了随机相元,相元在光场传播时相互作用干涉,产生随机相位。图 1 给出了散斑噪声产生的原因。

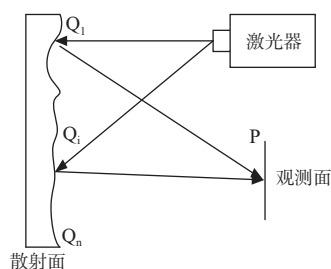


图 1 散斑噪声的形成原理

Fig. 1 Formation principle of speckle noises

粗糙表面散射产生的随机相位叠加决定了全息干涉图中各处散斑的明暗程度。散斑的随机相位叠加过程如图 2 所示,矢量的长度和方向是随机

的,较粗箭头表示复数之和。图 2(a)为相长叠加对应干涉图样中的亮斑,图 2(b)为相消叠加对应干涉图样中的暗斑。

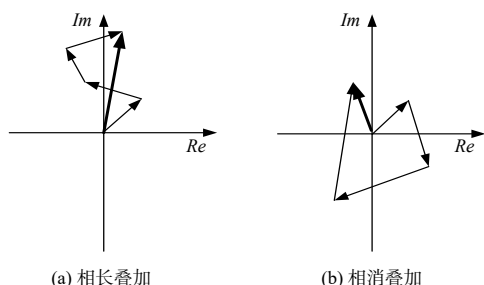


图2 随机相位叠加

Fig. 2 Random phase superposition

假设从粗糙物体表面上一点 Q_i 发出的光在观察面的复振幅为

$$E_i(p) = a_R(x_i, y_i) \exp[j\varphi(x_i, y_i)] \cdot \exp[j\varphi(r)] \quad (1)$$

式中: $a_R(x_i, y_i)$ 为粗糙表面散射光的振幅; $\varphi(x_i, y_i)$ 为不同散射效应下的随机分布相位; $\varphi(r)$ 为传播相位因子。P点的振幅为散射面上所有点的叠加,即:

$$E(p) = \sum_{i=1}^N a_R((x_i, y_i) \exp[j\varphi(x_i, y_i)] \cdot \exp[j\varphi(r)] \quad (2)$$

那么P点强度为

$$I(p) = |E(p)|^2 = \left| \sum_{i=1}^N a_R((x_i, y_i) \exp[j\varphi(x_i, y_i)] \cdot \exp[j\varphi(r)] \right|^2 \quad (3)$$

散射介质不同位置的粗糙程度差异使 $E(p)$ 为随机的,造成各处光强各不相同,进而形成散斑噪声。

1.2 石英退偏器空域退偏分析

由上述分析得到了散斑的成因,即由于高相干度的激光源及粗糙物体表面等因素造成。通过在数字全息光路中加入二元结构的石英退偏器,可以有效地降低物参光束的相干度,从而减少散斑噪声。

石英的旋光特性可以使通过石英晶体的偏振光的振动面发生旋转,本文的二元结构石英退偏器由两块左右旋转的石英块组合而成,两块晶体的旋光性相反且结构角大小相等,其结构图如图3所示。

图3(a)为石英退偏器的侧面,图3(b)为退偏器的端面。图3中圆是通光孔径,O为光瞳中心, d_0 为退偏器的长度, β 为要求相同的结构角。当光束在退偏器中沿着Z光轴传播时,退偏器起到旋光器的作用。宏观上,某一横截面的单色线偏振物

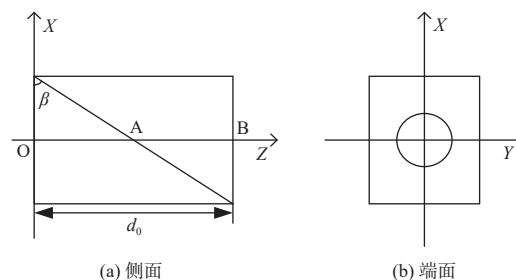


图3 石英退偏器结构图

Fig. 3 Structure diagram of quartz depolarizer

光束到达石英晶体块的位置不同,形成的旋光角度各不相同,那么在出射截面得到的是振动方向连续复杂变化的无序混合光,从而使线偏振光束退偏。下面对此石英退偏器的退偏效应进行定性分析。

假设光在两块晶体中通过的路程分别为 $S_{OA} = d_1$ 和 $S_{AB} = d_2$,则退偏器的米勒矩阵表示为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ 0 & -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:旋光角 $\varphi = \alpha L$, α 为物质的旋光率, L 为光束经过石英晶体块的距离。 α 与波长 λ 有关,即 $\alpha = \frac{\Delta n}{\lambda} \pi$, Δn 为石英的双折射率, $L = (d_1 - R \tan \beta) - (d_2 + R \tan \beta)$,则:

$$2\varphi = 2\alpha L = 2\alpha [(d_1 - R \tan \beta) - (d_2 + R \tan \beta)] = fx + b \quad (5)$$

式中: $f = -4\alpha R \tan \beta$; $b = 2\alpha (d_1 - d_2)$; x 为归一化坐标, $-1 \leq x \leq 1$; R 为光瞳半径。因此此装置的退偏效果是在空域内实现的,故先对 M 在光瞳范围内积分,求得平均米勒矩阵 $\bar{M} = \int_{\Sigma} M dx dy$ 。在光瞳范围

内分别对 $\cos 2\varphi$ 和 $\sin 2\varphi$ 积分,则有:

$$(\cos 2\varphi)_{\Sigma} = \frac{1}{\pi} \int_{\Sigma} \cos(fx + b) dx dy = 2 \cos b \frac{J_1(f)}{f} \quad (6)$$

$$(\sin 2\varphi)_{\Sigma} = \frac{1}{\pi} \int_{\Sigma} \sin(fx + b) dx dy = 2 \sin b \frac{J_1(f)}{f} \quad (7)$$

式中 $J_1(f)$ 为一阶贝塞尔函数。

退偏器的平均米勒矩阵可以表示为

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 \cos \frac{J_1(f)}{f} & 2 \sin b \frac{J_1(f)}{f} & 0 \\ 0 & -2 \sin b \frac{J_1(f)}{f} & 2 \cos \frac{J_1(f)}{f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

当入射光线的偏振方向与 X 轴夹角为 θ 时, S_{in} 、 S_{out} 分别表示输入光和输出光的斯托克斯矢量, 它

们与平均米勒矩阵 $\overline{M}$ 的关系为

$$S_{out} = \overline{M} S_{in} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\cos\frac{J_1(f)}{f} & 2\sin\frac{J_1(f)}{f} & 0 \\ 0 & -2\sin\frac{J_1(f)}{f} & 2\cos\frac{J_1(f)}{f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2\cos\left(b - 2\theta\frac{J_1(f)}{f}\right) \\ -2\sin\left(b - 2\theta\frac{J_1(f)}{f}\right) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)可知, 由于线偏振光束垂直入射到退偏器时位置不同, 那么光通过晶体块的距离 d_1 、 d_2 也不同, 出射时光线的振动方向各不相同。如果穿过石英晶体块的距离变化足够大, 随着距离的改变, 出射光会在线偏振光、圆偏振光以及椭圆偏振光之间做周期性变化, 呈现出各异的偏振状态。在出射光截面, 总的积分效果可以看成空域上的平均退偏, 不再是完全偏振光, 实现了退偏, 进而达到了降低相干度的目的。

由偏振度的定义可知出射光的偏振度为

$$P = \frac{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}}{S_0} = 2 \left| \frac{J_1(f)}{f} \right| = 2 \left| \frac{J_1\left(4\frac{\Delta n}{\lambda}\pi R \tan\beta\right)}{4\frac{\Delta n}{\lambda}\pi R \tan\beta} \right| \quad (10)$$

由式(10)可知, 当采用单色激光源以及确定的石英退偏器时, 式中 λ 、 Δn 、 β 一定, 那么偏振度只取决于光瞳半径 R 。只要改变光瞳半径大小, 就可以得到不同偏振度的出射光, 实现对物光在空域上不同程度的退偏效果, 从而实时地达到与参考光具有不同程度的相干性的目的。

1.3 电控液晶散射片理论分析

电控液晶散射片结构示意图如图4所示。在

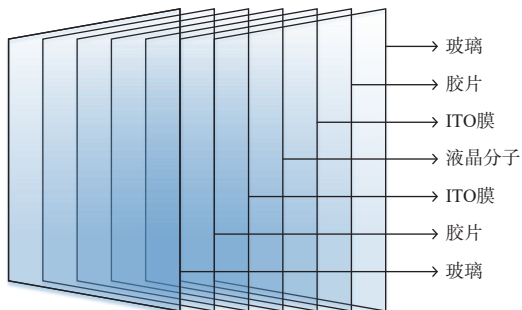


图4 电控液晶散射片结构图

Fig. 4 Structure diagram of electronically controlled liquid crystal diffuser

两片电极基片之间注入一些向列型液晶, 电极基片由表面都覆盖了一层掺锡氧化铟 (indium tin oxides, ITO) 薄膜的两块平整薄玻璃构成。ITO 是一种透明且导电的 N 型氧化物半导体, 在 ITO 玻璃上进行涂覆定向剂处理, 可以使液晶分子的取向排列平行于玻璃表面, 密封起来就形成扁平的液晶盒。

在物光路加入电控液晶散射片, 可以实现全息散斑去噪, 主要是利用了液晶在外加电场下产生的动态散射效应。由于液晶电导率和介电常数各向异性, 当对向列型液晶盒施加电场时, 两块导电 ITO 玻璃中液晶分子轴取向发生改变, 液晶指向矢分布, 因此发生变化, 这种特性使电控液晶具有良好的光学调制能力。液晶分子光轴的偏转角度 α 随电压 V 变化, 满足:

$$\alpha = \begin{cases} 0, & V \leq V_{th} \\ \frac{\pi}{2} - 2\tan^{-1}\left[\exp\left(\frac{V_{th} - V}{V_0}\right)\right], & V > V_{th} \end{cases} \quad (11)$$

式中: V_{th} 是阈值电压; V_0 为盈亏电压。只有当外加电压大于阈值电压时, 偏转角度 α 随着驱动电压的增大而增大, 直到达到最大值 $\frac{\pi}{2}$, 实验所用液晶散射片的阈值电压为 4 V。

入射光束经过这些运动状态无序和光轴取向改变的液晶分子时会产生动态散射, 使光束光强的分布、光线传播方向和传播时间延迟发生改变, 从而改变光束的相干性。发生角度偏转的分子比例以及液晶分子的轴向变化程度与外加电压大小相关, 当外加电压超出阈值电压时, 液晶盒中央处的液晶分子首先发生角度偏转, 随着电压的增大, 因电控而偏转的分子数量越来越多, 偏转程度越来越剧烈, 这意味着液晶散射片的光调制能力逐渐增强, 使参物光束的相干程度进一步降低。本文采用的液晶散射片根据电压值的改变, 可以提供多达 15 种不同的散射效果, 达到快速灵活控制入射光束相干性, 进而得到部分相干光的目的。对比放置旋转毛玻璃抑制全息系统中的散斑噪声^[25]

方法,本文采用的电控液晶散射片去噪方法具有操控简单和快速响应的优点。

1.4 组合装置去噪分析

本文首次提出将石英退偏器与电控液晶散射片相结合用于数字全息术中,其中退偏器由两块结构角相等的旋光石英晶体块相互紧贴组合而成。某一截面入射光束上的不同点经过组合晶体光楔后分解为e光和o光,晶体对e光和o光有不同的折射率。假设沿光轴方向传播的光束在两块晶体中的折射率为 $n_{o1} < n_{e1}$, $n_{o2} > n_{e2}$, $n_{o1} = n_{e2}$, $n_{e1} = n_{o2}$,则有 $n_{o1} < n_{o2}$, $n_{e1} < n_{e2}$ 。

出射时2个旋转电矢量与到达入射面时相比,相位分别滞后 φ_R 和 φ_L :

$$\varphi_R = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{o1}d_1 + n_{o2}d_2) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{o1}d_1 + n_{e1}d_2) \quad (12)$$

$$\varphi_L = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{e1}d_1 + n_{e2}d_2) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{e1}d_1 + n_{o1}d_2) \quad (13)$$

由式(12)、式(13)和折射率的大小关系可知,光线到达各个位置的厚度不同,那么从石英退偏器出射时就会产生不同的相位延迟量,可实现对光束第一次相位调制,使不同位置出射光的偏振态不同。如果相位延迟量的分布范围是 $[0, 2k\pi]$ (k 为整数),则出射光的偏振态将在空间上做周期性变化,并且包含了所有偏振态,产生的随机偏振实现了对入射光束退偏。

从退偏器出射的光束再经过液晶散射片,具有电导率和介电常数各向异性,因此液晶可以作为一种理想的散射体,即外加电场会引起液晶分子重新排列以及光轴取向改变。通过液晶的光束发生不规则散射,这种动态散射效应会导致光强分布改变、传播角度和传播时间延迟发生差异,向列液晶分子重新分布的特性实现了对物光再次调制,从而降低了光束的相干性。根据实验条件变化,适时调整液晶驱动电压,可以改变参与偏转的液晶分子比例以及偏转程度,达到对入射光的不同散射效果,实现参物光束不同程度的相干。

在数字全息系统的物光路同时放置石英空域退偏器和电控液晶散射片,形成一个简单、灵活可控的去噪模块,可以对物光进行复合调制,降低参考光与物光的相干程度,从而达到减少散斑噪声的目的。

2 实验及分析

图5为本文所提方法的光路结构示意图。图5

中Laser为可产生波长532 nm的绿光激光器;M为平面反光镜;BS为分光棱镜;MO1和MO2为数值孔径(NA)0.25的显微物镜,规格分别为10 $\times$ 和20 $\times$;ND是光学旋转渐变片,用来调节参考光的强度;DQ为石英退偏器;Liquid为电控液晶散射片;图像传感器(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)记录全息干涉图,分辨率为1280 $\times$ 1022像素,单个像素尺寸为5.3 μm $\times$ 5.3 μm ;PC为工作站级的计算机;Object为实验被测对象,本次实验分别选取长、宽、高均为10 mm的骰子和直径19 mm的一角硬币;物体距离CMOS分别为0.68 m和1.25 m,两束干涉光的夹角约为5 $^\circ$ 。为了检验本文所提方法的有效性,设置了严格的对照实验,图6(a)~图6(h)为对应各方法的重建结果及局部区域放大图。

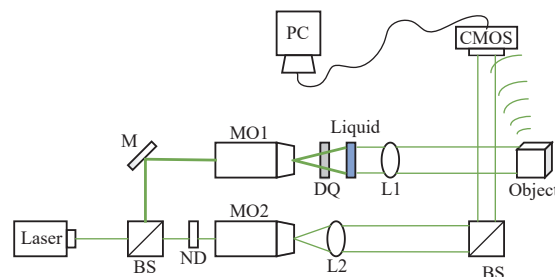


图5 光路结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of optical path

从图6(c)和图6(d)中可以看出,对原始骰子和硬币重建图,退偏后的重建图更为平滑,也就是散斑噪声水平更低,同时物体细节更加清晰完整,图像质量明显提升。图6(e)和图6(f)为外加52 V电压的液晶散射片去噪重建图,无论是高频还是低频噪声都有明显抑制效果,证明了液晶散射片对光束具有退相干作用,但是发现物体边缘不够完整,这是因为重建过程中丢失了部分高频信息。图6(g)和图6(h)是在图6(e)和图6(f)的基础上添加石英退偏器进行组合叠加去噪,起到了进一步抑制噪声的效果。从主观感知上来看,图6(g)和图6(h)相较于图6(c)和图6(d)更为平滑,比图6(e)和图6(f)的轮廓边缘更加清晰,可以观察到更多的物体信息,证明图6(g)和图6(h)的综合去噪效果最佳。

为了更精确地评价重建图像质量,除了通过主观视觉上对比外,本文还采用了多种评价指标对不同方法的重建结果进行了比较,这些客观指标包括峰值信噪比(peak signal to noise rate, PSNR)、结构相似度(structural similarity index, SSIM)、等效

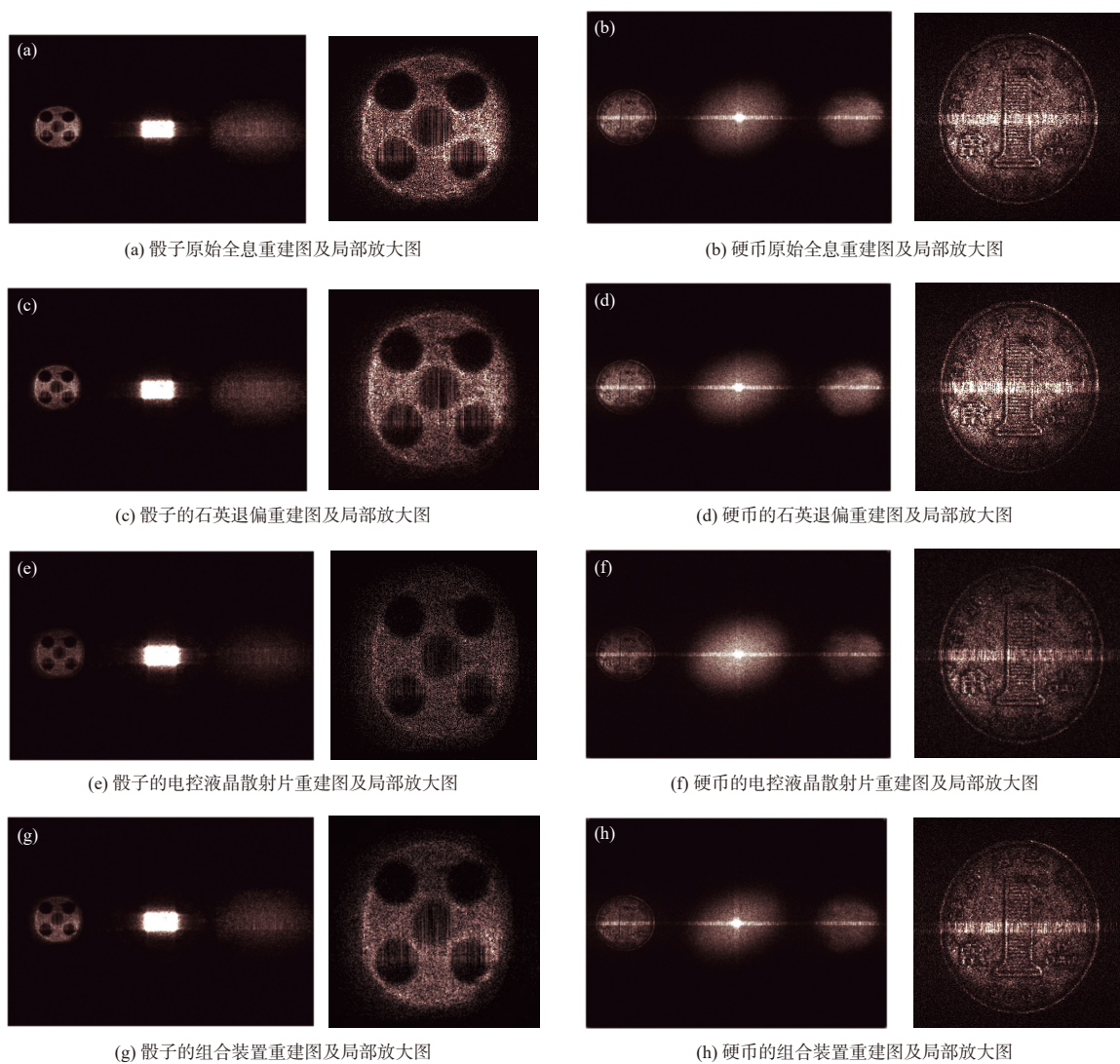


图 6 几种方法的重建图对比

Fig. 6 Comparison of reconstruction images of several methods

视数 (equivalent number of looks, ENL) 以及散斑指数 (speckle index, SI)。其中 PSNR 借助均方误差计算图像的失真情况, PSNR 值越大, 代表图像失真程度越低; SSIM 的取值范围为 $[0,1]$, SSIM 越高, 表示图像与参考像越接近; ENL 可以评价图像斑点噪声水平, ENL 值越高, 散斑噪声水平越低, 图像质量越高; SI 用来衡量不同方法对散斑噪声的抑制能力, SI 值越小, 抑制效果越好。表 1 和表 2 分别给出了不同方法下骰子和硬币重建图像的定量指标。从表 1 和表 2 中可以看出, 组合装置的 PSNR 和 SSIM 均高于其他两种单一装置, 即本文所提方法的重建像整体质量最高; 骰子和硬币原始全息图重建像的 ENL 分别为 0.66 和 0.71, 本文所提方法的 ENL 达到了 0.94 和 0.92, 较原始重建像提高了 42% 和 30%, 也优于其他两种方法, 即在 3 种方

表 1 不同方法下骰子重建像的客观指标

Table 1 Objective indicators of reconstructed images of dice under different methods

方法	PSNR	SSIM	ENL	SI
石英退偏器	16.79	0.43	0.69	1.89
电控液晶散射片	16.01	0.41	0.82	1.66
组合装置	16.91	0.47	0.94	1.52

表 2 不同方法下硬币重建像的客观指标

Table 2 Objective indicators of reconstructed images of coin under different methods

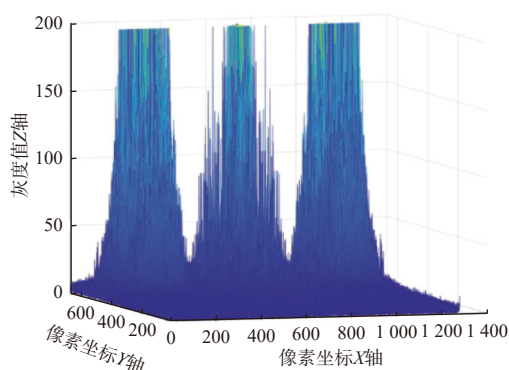
方法	PSNR	SSIM	ENL	SI
石英退偏器	16.34	0.29	0.74	1.46
电控液晶散射片	16.23	0.27	0.89	1.35
组合装置	18.30	0.43	0.92	1.29

法中噪声水平最低。对比3种方法的散斑指数可以看出,组合装置对散斑噪声的抑制效果最好,图像质量最佳。表1和表2中的4种评价指标分析与图6中不同方法重建图的视觉效果对比结果一致,证明了本文所提方法在全息重建图中的有效性。

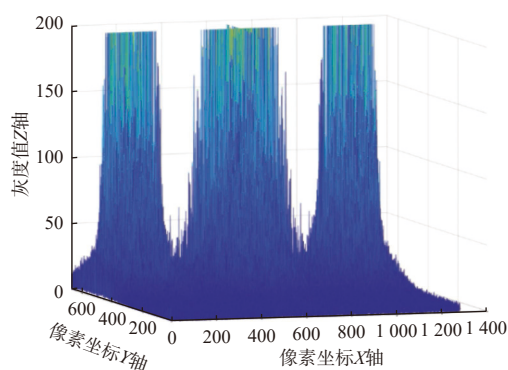
下面分析各组实验结果的频谱图,进一步检验不同方法的去噪能力。图7(a)~图7(h)是图6(a)~图6(h)中各重建像对应的三维频谱图。

对比图7(c)~图7(h)的频谱与图7(a)和图7(b)的频谱可以看出,三种方法都在不同程度上抑制了全息图散斑噪声。通过观察分析三维频谱图0级像与 ± 1 级像边缘细节以及空隙质量,可衡量各方法的去噪能力。从图7(a)和图7(b)可以看出,

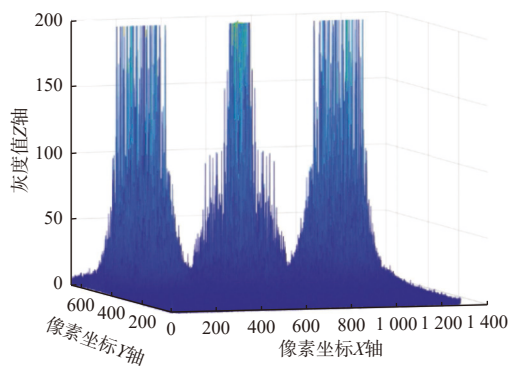
骰子和硬币原始全息重建图中0级像频谱与 ± 1 级像频谱三者之间都存在较大的串扰,这些噪声串扰造成了图6(a)和图6(b)重建质量不高。图7(c)和图7(d)为石英退偏去噪效果,由于石英的旋光性改变了出射光的偏振态,降低了相干性, ± 1 级像与0级像之间的串扰大大减少,毛刺高度和数量都得到抑制,因此显现出了更多的物体信息。图7(e)和图7(f)为电控液晶散射片去噪后的频谱图,可以看到, ± 1 级像与0级像显著分离,这是因为液晶的降低相干特性抑制了散斑噪声。但是因为动态散射导致无数液晶分子轴向的无序性,当散射光线发散角过大时,不可避免地造成小部分物光波逃逸丢失,物光无法全部照射到物体,进而无法记



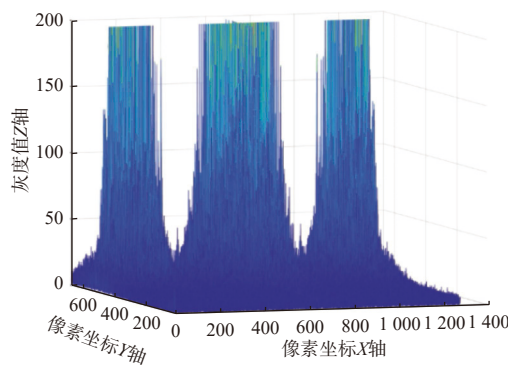
(a) 骰子的原始全息重建图的三维频谱



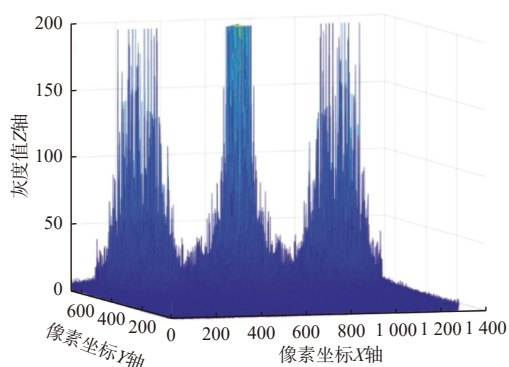
(b) 硬币的原始全息重建图的三维频谱



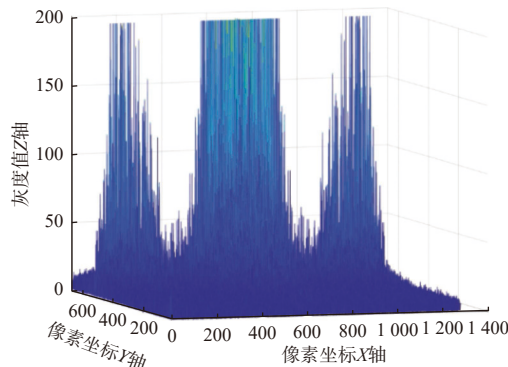
(c) 骰子的石英退偏重建图的三维频谱



(d) 硬币的石英退偏重建图的三维频谱



(e) 骰子的电控液晶散射片重建图的三维频谱



(f) 硬币的电控液晶散射片重建图的三维频谱

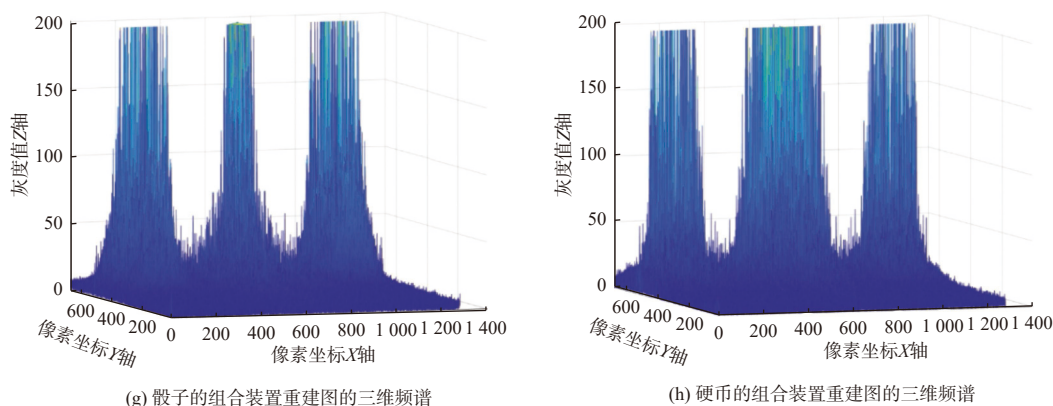


图7 对图6归一化处理后的三维频谱图

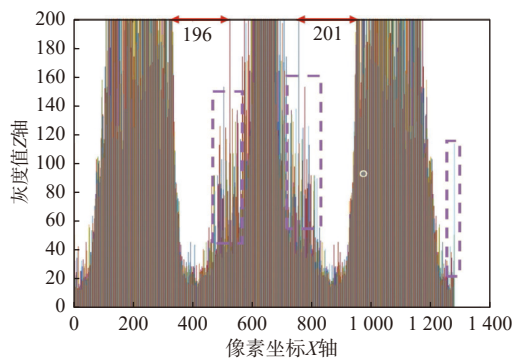
Fig. 7 3D spectrogram obtained by normalized processing of figure 6

录到 CMOS 上,使得部分高频信息丢失,造成了去除噪声的同时也丢失了许多物体边缘信息。图 7(g) 和图 7(h) 为组合叠加去噪的效果,可以看出,比起原始全息图,此方法也使 ± 1 级像与 0 级像空隙距离增大,显著去除了散斑噪声,比图 7(c) 和图 7(d) 去噪效果更明显,比图 7(e) 和图 7(f) 保留了更多的高频信息部分。图 7(g) 和图 7(h) 的重建像质量因为组合方法中两种装置的互补效果而得到明显提高。

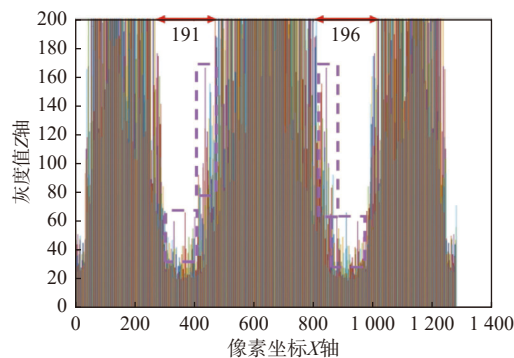
为了更为直观准确地比较频谱图反映的信息,进一步对三维频谱进行二维曲线分析。图 8(a)~图 8(h) 分别为图 7(a)~图 7(h) 的横切面图,测量计

算了 ± 1 级与 0 级像频谱之间的边缘距离和 ± 1 级范围信息,并进行了数值分析。

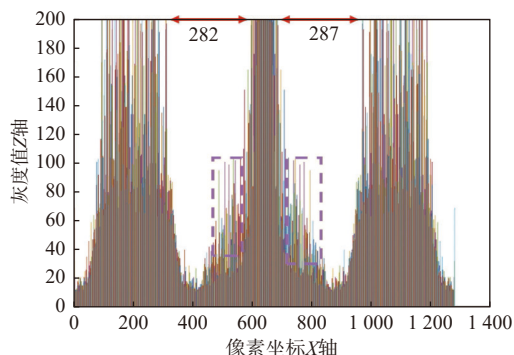
比较图 8(a)~图 8(h) 的频谱横切面图 ± 1 级像与 0 级像边缘细节以及三者间的空隙质量,可以更加清楚地看出不同方法的降噪效果。对比图 8(a)~图 8(d) 中紫色虚框可以看出,图 8(a) 和图 8(b) 的 ± 1 级像与 0 级像的毛刺数量和高度因为加入石英退偏器都得到抑制,使得物体信息更加完整清晰,但是毛刺仍有部分残余,噪声去除效果不够理想。图 8(a) 和图 8(b) 的 ± 1 级像与 0 级像频谱边缘仅间隔 196 个像素点和 201 个像素点以及 191 个像素点和 196 个像素点,过近的空隙距离意味着三



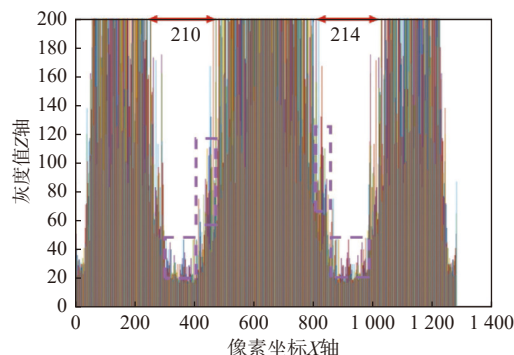
(a) 散子的原始全息重建图的三维频谱横切面图



(b) 硬币的原始全息重建图的三维频谱横切面图



(c) 散子的石英退偏重建图的三维频谱横切面图



(d) 硬币的石英退偏重建图的三维频谱横切面图

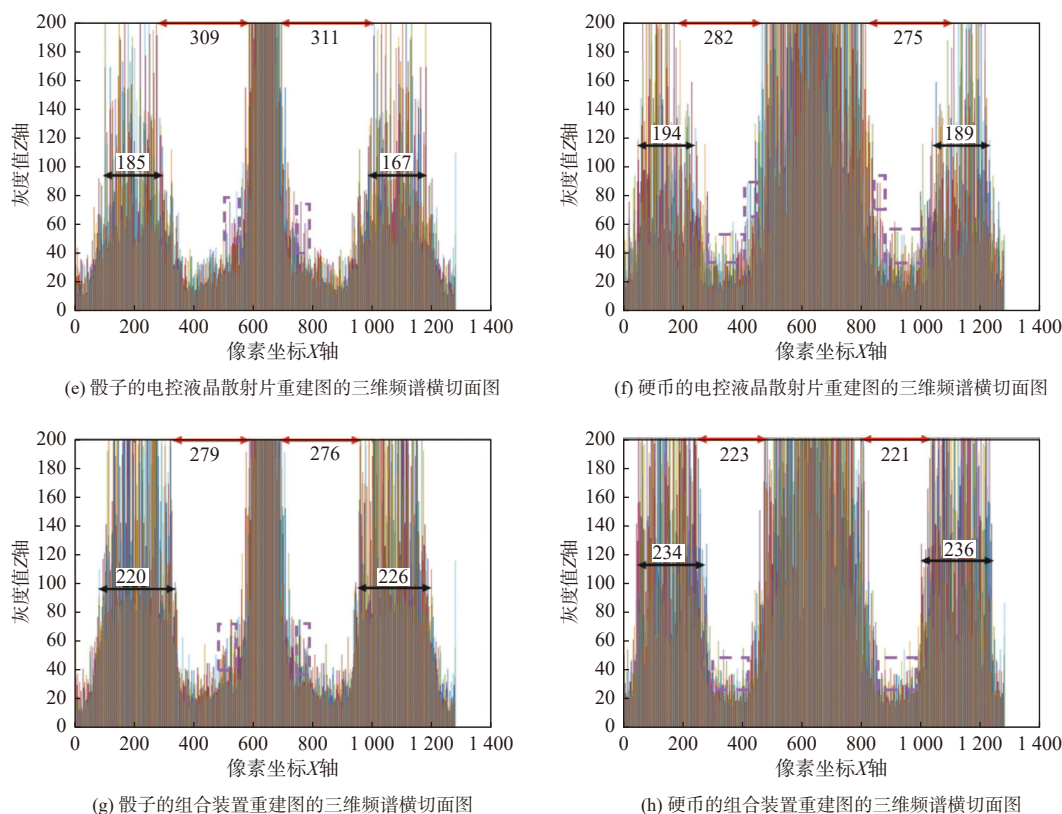


图8 对应图7的三维频谱横切面图

Fig. 8 3D frequency spectrum cross-section diagram corresponding to figure 7

者之间存在着较大串扰,导致了图6(a)和图6(b)模糊不清。图8(c)和图8(d)中 ± 1 级像与0级像间隔282个像素点和287个像素点以及210个像素点和214个像素点,空域退偏后三者明显分离,远高于图8(a)和图8(b)中左右间隙距离,这是因为退偏器降低相干特性抑制了散斑噪声,使得噪声下降。图8(e)和图8(f)为电控液晶散射片退相干去噪效果,液晶作为理想的散射体,当外加了最大52 V额定电压时表现出最强的散射效果,此时毛刺数量和高度得到明显抑制,最大程度地降低了噪声。从图8(e)和图8(f)可以看到, ± 1 级都有少量高频细节丢失,即此方法获得极佳去噪效果的结果是牺牲了部分物体信息。图8(g)和图8(h)为组合装置去噪后得到的频谱图,与图8(a)和图8(b)的虚线框毛刺部分对比可以看出,噪声得到明显抑制,且去噪效果较图8(c)和图8(d)更佳,与图8(e)和图8(f)相比,它的 ± 1 级像左右边界范围分别为220个像素点和226个像素点以及234个像素点和236个像素点,远高于图8(e)和图8(f)的185个像素点和167个像素点以及194个像素点和189个像素点,即组合方法保留了更多物体高频信息,组合装置的互补效果使物体信息展现得

更加清楚完整。

3 结论

本文首次将石英退偏器与电控液晶散射片相结合,对数字全息术中的散斑噪声进行抑制,获得了更高质量的重建图。首先,通过石英退偏器光瞳的光束,出射光偏振态将发生空间上的变化,产生随机偏振,对入射光束的退偏实现了物光束的第一次调制;出射的光束再经过液晶散射片,通过外加电场可以引起液晶分子运动和光轴取向改变,调整液晶驱动电压可改变入射光的不同散射效果,从而破坏光束的相干性,液晶分子重新分布的特性再一次调制物光束;组合装置方法是通过物光束进行复合调制,有效抑制重建像中的噪声,保留了尽可能多的物体信息。此组合方法结构简单,易于实现,适用于传统的数字全息结构,由于方案采用电控方式,具有操控简便和可以迅速响应实现实时性的优点。

下一步研究重点是将组合降噪方法应用到数字全息显微术中,在诸如生物细胞检测等应用领域发挥作用。研究如何在提高图像传感器性能的

同时,结合更先进的图像去噪算法,软硬件结合实现更佳的降噪效果。散斑光场中被测物体与背景区域的偏振信息有所差异,根据这一特性,进一步研究将本文的组合去噪方法与偏振散斑成像技术相结合,在数字全息术中实现高质量的偏振成像。

参考文献:

- [1] BENJAMIN R, PIERRE M, ETIENNE C, et al. Measurement of the integral refractive index and dynamic cell morphometry of living cells with digital holographic microscopy[J]. *Optics Express*, 2005, 13(23): 9361-9373.
- [2] BJORN K, GERT V B. Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(4): A52-A61.
- [3] CHEN W, JAVIDI B, CHEN X. Advances in optical security systems[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(2): 120-155.
- [4] JIAO S M, ZHOU C Y, SHI Y S, et al. Review on optical image hiding and watermarking techniques[J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 109: 370-380.
- [5] YAIR R, AVIV S M, ZEEV Z. Compressive Fresnel holography approach for high-resolution viewpoint inference[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5606-5614.
- [6] 陈刚, 周文静, 胡祯, 等. 表面粗糙度数字全息检测[J]. *应用光学*, 2014, 35(6): 1040-1047.
CHEN Gang, ZHOU Wenjing, HU Zhen, et al. Surface roughness measurement based on digital holography[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(6): 1040-1047.
- [7] JEONG W, SON K, CHO J, et al. Suppression algorithm of speckle noise for parallel phase-shift digital holography[J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 112: 93-100.
- [8] LIU Y, WANG Z, HUANG J. Recent progress on aberration compensation and coherent noise suppression in digital holography[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(3): 444.
- [9] LANGEHANENBERG P, BALLY G V, KEMPER B. Application of partially coherent light in live cell imaging with digital holographic microscopy[J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 57(9): 709-717.
- [10] 张佳莹, 王红军, 朱学亮, 等. 毛玻璃转速对干涉条纹成像质量的影响[J]. *光电工程*, 2018, 45(1): 25-30.
ZHANG Jiaying, WANG Hongjun, ZHU Xueliang, et al. Effect of speed of rotated diffuser on image quality of interference fringes[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(1): 25-30.
- [11] SOMEKH M G, SEE C W, GOH J. Wide field amplitude and phase confocal microscope with speckle illumination[J]. *Optics Communications*, 2000, 174(1): 75-80.
- [12] 王大勇, 王云新, 郭莎, 等. 基于多角度无透镜傅里叶变换数字全息的散斑噪声抑制成像研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(15): 175-180.
WANG Dayong, WANG Yunxin, GUO Sha, et al. Research on speckle noise suppression imaging based on multi-angle lensless Fourier transform digital holography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(15): 175-180.
- [13] TURKO N A, JACOB E P, ITAY B, et al. Simultaneous three-wavelength unwrapping using external digital holographic multiplexing module[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1943-1946.
- [14] FLORIAN C, ANCA M, FREDERIC M, et al. Cell refractive index tomography by digital holographic microscopy[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2): 178-180.
- [15] 赵高长, 张磊, 武风波. 改进的中值滤波算法在图像去噪中的应用[J]. *应用光学*, 2011, 32(4): 678-682.
ZHAO Gaochang, ZHANG Lei, WU Fengbo. Application of improved median filtering algorithm to image denoising[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 678-682.
- [16] 朱维文, 赵跃进, 朱慧时, 等. 改进的均值滤波算法在太赫兹成像中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5): 1241-1246.
ZHU Weiwen, ZHAO Yuejin, ZHU Huishi, et al. Improved mean filtering algorithm in THz imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1241-1246.
- [17] CAI X. Reduction of speckle noise in the reconstructed image of digital holography[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2008, 121(4): 394-399.
- [18] SHARMA A, SHEORAN G, JAFFERY Z A, et al. Improvement of signal-to-noise ratio in digital holography using wavelet transform[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 46(1): 42-47.
- [19] LEO M, PICCOLO R, DISTANTE C, et al. Multilevel bi-dimensional empirical mode decomposition: a new speckle reduction method in digital holography[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 112314.
- [20] SRIVASTAVA R, GUPTA J, PARTHASARTHY H.

- Comparison of PDE based and other techniques for speckle reduction from digitally reconstructed holographic images[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 48(5): 626-635.
- [21] 赵媛媛, 贾振红, 覃锡忠, 等. 结合高频强调滤波与Lee滤波的全息图再现像降噪方法[J]. *激光杂志*, 2015, 36(11): 36-39.
- ZHAO Yuanyuan, JIA Zhenhong, QIN Xizhong, et al. A method of reconstructing image denoising method with high frequency emphasis filtering and Lee filtering[J]. *Laser Journal*, 2015, 36(11): 36-39.
- [22] SUCERQUIA J G, RAMIREZ J A H, PRIETO D V. Reduction of speckle noise in digital holography by using digital image processing[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2004, 116(1): 44-48.
- [23] AMITAI U, YAIR R, ADRIAN S. Speckle denoising in digital holography by nonlocal means filtering[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(1): A195-A200.
- [24] KOSTADIN D, ALESSANDRO F, VLADIMIR K, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of The IEEE Signal Processing Society*, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [25] 涂桥, 于瀛洁, 周文静. 基于旋转毛玻璃片的全息系统去噪处理[J]. *光学仪器*, 2014, 36(4): 337-341.
- TU Qiao, YU Yingjie, ZHOU Wenjing. Denoising of holographic system based on rotating frosted glass sheet[J]. *Optical Instruments*, 2014, 36(4): 337-341.