

一种基于螺旋波带片的无透镜边缘增强成像技术

田占全, 李丽娜, 孙达, 马建设, 苏萍*

清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055

摘要 提出一种基于螺旋波带片的无透镜编码边缘增强成像技术,用螺旋波带片和图像传感器组成成像系统,对拍摄的图片进行反向传播重建。在反向传播中,取强度值可实现各向同性边缘增强成像,取实部或虚部可实现各向异性边缘增强成像。对取实部实现各向异性边缘增强成像进行理论推导,引入初始相位因子实现方向可选择的各向异性边缘增强成像。数值模拟和实验验证了理论分析与实验结果的一致性。对基于菲涅耳波带片、螺旋波带片的无透镜成像系统的边缘增强重建结果进行定量对比分析,结果证明基于螺旋波带片的无透镜成像系统更适用于边缘增强成像。所提技术在缺陷检测、智能识别和虚拟现实技术等领域具有广阔的应用前景。

关键词 无透镜成像; 边缘增强; 螺旋波带片; 编码掩模; 图像重建

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223452

Lensless Edge Enhancement Imaging Technology Based on Spiral Zone Aperture

Tian Zhanquan, Li Lina, Sun Da, Ma Jianshe, Su Ping*

Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong, China

Abstract In this study, we propose a lensless coding edge enhancement imaging technology based on a spiral zone aperture whose system comprises a spiral zone aperture and an image sensor. A captured image is reconstructed by backpropagation. In backpropagation, isotropic edge enhancement imaging can be realized by taking the intensity value, whereas anisotropic edge enhancement imaging can be realized by taking the real or imaginary part. The theoretical derivation and verification of the anisotropy edge enhancement imaging achieved by taking the real part are performed, and an initial phase factor is introduced to realize the anisotropic edge enhancement imaging with selective directions. Our numerical simulations and experimental results verify the consistency between theoretical analysis and experimental results, and a quantitative comparative analysis is performed for the edge enhancement reconstruction results using the lensless imaging system with Fresnel and spiral zone apertures respectively. The results verify that a spiral zone aperture is more suitable for edge enhancement imaging. The proposed technology can be applied to intelligent recognition, defect detection, and virtual reality tasks.

Key words lensless imaging; edge enhancement; spiral zone aperture; coded mask; imaging reconstruction

1 引言

伴随着可穿戴设备、可植入设备、微型无人机、微型机器人及物联网等的发展,新一代的光电成像系统正朝着微型化、集成化、低成本方向发展^[1-2]。传统的透镜成像系统利用镜头模组一一对应的映射方式会聚光线并进行成像,镜头模组增加了成像系统的体积、成本和重量。基于编码掩模的无透镜成像系统利用特定

的编码掩模替代了传统的镜头,通过一对多的映射方式对入射光线进行调制,并在传感器处形成编码图像,最后采用计算成像编码重建算法将原始图像恢复出来^[3-4]。

传统编码成像技术主要应用于衍射效应可忽略的短波长辐射或粒子源(如中子、高能 X 射线等),在天文学、核医学上有着广泛的应用。1961 年,由 Mertz L 和 Young N 提出了波带片编码成像(ZPCI)技术,用波带

收稿日期: 2022-12-31; 修回日期: 2023-01-16; 录用日期: 2023-02-06; 网络首发日期: 2023-02-16

基金项目: 深圳市重点基础研究基金(JCYJ20200109143031287)

通信作者: *su.ping@mail.sz.tsinghua.edu.cn

片代替透镜实现了编码成像^[5]。近年来,随着加工工艺和图像处理技术的发展,适用于可见光波段的编码掩模逐渐被研发设计出来,如可分离掩模^[6-9]、漫散射屏^[10-12]、菲涅耳波带片^[3, 13-14],并结合深度学习提出了相应的高效重建算法,在动态捕获^[15-16]、3D 成像^[10, 17-19]、高光谱成像^[20]、重聚焦^[14, 21]等方面也有了深入的应用研究。

边缘增强可以有效地提高图像边界区域的成像质量,用于突出显示图像的边缘细节信息^[22-23]。目前边缘增强技术已经在光学显微成像、指纹检测、天文观测等诸多领域有了广泛的应用^[24-25]。在非相干光照明的可见光波段无透镜编码掩模成像领域^[26],关于波带片编码成像领域解码获得具有边缘增强特征的重建图像的研究迄今鲜有报道。在手势识别、缺陷检测、动态追踪等领域,边缘增强成像对提升检测识别率、提高成像质量等具有重要的意义。在粒子源成像领域,已有相关报道利用螺旋波带片获得粒子源边缘增强图像,通过利用螺旋滤波在频域重新分配能量以达到边缘增强的效果^[27],同时,螺旋滤波在复用通信领域也有了广泛的应用^[28]。

本文提出了一种基于螺旋波带片的无透镜编码边缘增强成像技术。在螺旋 ZPCI 技术中,通过在反向传播过程引入振幅调制项,提升对比度,取整体强度或取实部虚部实现了各向同性、各向异性边缘增强。在非涅耳 ZPCI 技术中,在计算重建过程中引入螺旋相位以实现边缘增强。通过控制螺旋相位的初始相位因子达到不同区域边缘增强的效果,从数值模拟和实验测试两个方面验证了所提技术获得高对比度、增强方向可

选择的边缘增强图像的可行性,为快速获得无透镜边缘增强图像提供了新的技术手段。

2 基于编码掩模的无透镜边缘增强模型

2.1 编码图像的记录

螺旋波带片(SZA)是由传统的菲涅耳波带片(FZA)和螺旋相位板进行逻辑运算得到的,其中二值化的振幅螺旋波带片可以表示为

$$T_{SZA}(r, \theta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{sgn} \left[\cos \left(\frac{\pi r^2}{r_1^2} - \theta \right) \right], \quad (1)$$

式中: (r, θ) 为极坐标; r_1 为波带片常数。利用螺旋波带片进行编码成像的原理如下:第一步,成像物体上每一点视为点光源,根据几何成像原理,每一个点光源发出的光线经过螺旋波带片,在传感器上投射出一个放大的螺旋波带片形状的阴影,所有点的投影集合构成了记录在传感器平面的类全息图;第二步,利用计算成像技术,通过反向传播(BP)进行重建恢复。图 1 为整个无透镜边缘增强系统框图。

对于编码掩模成像,传感器接收到的类全息图 $I_{\text{holo}}(r, \theta)$ 可以表示为物体和放大的掩模图像的卷积:

$$I_{\text{holo}}(r, \theta) = O(r, \theta) * T(r, \theta) + e(r, \theta), \quad (2)$$

式中: $*$ 表示卷积; $O(r, \theta)$ 表示成像物体; $T(r, \theta)$ 表示波带片投影的强度分布; $e(r, \theta)$ 表示成像系统中各种因素引入的噪声,包括传感器噪声、环境光噪声及衍射效应带来的误差等。若物体到掩模的距离为 z_1 ,掩模到传感器的距离为 z_2 ,由于 $z_1 \gg z_2$, $T(r, \theta)$ 与透射率函数可以认为等价,后续均用 r_1 进行计算。

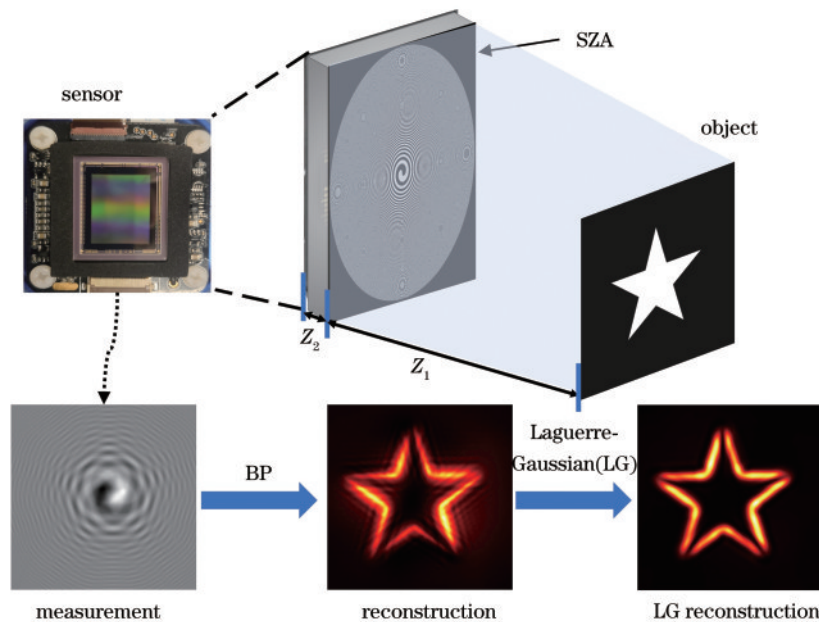


图 1 基于螺旋波带片编码的无透镜边缘增强系统

Fig. 1 Schematic of a lensless edge enhancement system based on spiral zone aperture coding

为了方便推导,利用连续型的波带片进行推导,可以将 $T_{\text{SZA}}(r, \theta)$ 表示为

$$T_{\text{SZA}}(r, \theta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \exp\left(-\frac{i\pi r^2}{r_1^2} + i\theta\right) + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{i\pi r^2}{r_1^2} - i\theta\right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} h_{\text{SZA}}(r, \theta) + \frac{1}{4} h_{\text{SZA}}^*(r, \theta), \quad (3)$$

式中: $h_{\text{SZA}}(r, \theta) = \exp[-i\pi r^2/r_1^2 + i\theta] = h(r) \exp(i\theta)$, h_{SZA}^* 为 h_{SZA} 的共轭, 当 $r_1^2 = \lambda d$ 时, $h(r)$ 与非涅耳衍射的传播核具有相同的表达式。进而类全息图可以表示为

$$I_{\text{holo}}(r, \theta) = C + \frac{1}{4} [O(r, \theta) * h_{\text{SZA}}(r, \theta) + O(r, \theta) * h_{\text{SZA}}^*(r, \theta)] + e(r, \theta), \quad (4)$$

式中: 前向模型可以表示为 $I_{\text{holo}} = \frac{1}{4} \mathcal{F}^{-1} H_{\text{SZA}} \mathcal{F} O + \frac{1}{4} \mathcal{F}^{-1} H_{\text{SZA}}^* \mathcal{F} O + e$, \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别代表傅里叶变换和傅里叶逆变换, 传递函数 H_{SZA} 为 $h_{\text{SZA}}(x, y)$ 的傅里叶变换。

2.2 各向同性边缘增强重建

Davis 等^[29]用螺旋相位滤波器在傅里叶频谱面对光场进行调控, 将一维希尔伯特变换单个方向上的边缘增强拓展为任意方向上的等向边缘增强:

$$S(r, \theta) = \exp[i\theta] \text{circ}\left(\frac{r}{R}\right), \quad (5)$$

式中: l 表示螺旋相位滤波器的拓扑荷数, θ_0 为初始相位, 通常取 $l=1, \theta_0=0$; (r, θ) 为频谱面的极坐标系; R 为孔径大小。对于螺旋波带片, $h(r)$ 用于波带片编码成像, $\exp(i\theta)$ 用于光场调制以实现边缘增强。因此在重建图像时只恢复编码的聚焦类全息图就可以得到边缘增强的成像结果, 进而前向模型可以表示为

$$\mathcal{F} I_{\text{holo}} = \frac{1}{4} H \mathcal{F} O_{\text{edge}} + \frac{1}{4} H^* \mathcal{F} O_{\text{edge}} + E, \quad (6)$$

式中: $H = i \exp[-i\pi r_1^2(u^2 + v^2)]$ 为 $h^*(r)$ 的傅里叶变换, (u, v) 为直角坐标系; H^* 是 H 的共轭项; O_{edge} 为原始图像的边缘增强图像; E 为误差在频域中的表达式。取强度 $|O_{\text{edge}}|^2$ 为各向同性边缘增强的结果, 整理式(6)得到

$$|O_{\text{edge}}|^2 = \left| 4\mathcal{F}^{-1} \frac{1}{H} \mathcal{F} I_{\text{holo}} + e \right|^2. \quad (7)$$

螺旋相位滤波器对应的点扩散函数(PSF)存在旁瓣, 滤波得到的图像边缘存在背景噪声。为了得到更高对比度的边缘图像, 在反向传播过程引入拉盖尔-高斯(LG)项调制的涡旋滤波器^[30]。调制后的涡旋滤波器中心振幅为 0, 沿径向渐变为 1。因此, 滤波后的全息图沿正一级方向的衍射效率降低, 抑制了涡旋滤波器的旁瓣, 消除了输入图像的低频部分, 成功减少了中心奇点对入射光产生的衍射噪声。LG 调制项的边缘

重建会更加锐利, 能够有效减少背景噪声, 提高图像的对比度。带有 LG 调制项的传递函数为

$$H_{\text{LG}} = H/A_{\text{LG}} = i \exp[-i\pi r_1^2(u^2 + v^2)] / \left\{ \frac{r}{w_1} \exp\left[-\left(\frac{r}{w_1}\right)^2\right] \right\}, \quad (8)$$

式中: $r^2 = u^2 + v^2$, w_1 为控制最大幅度位置的参数。

对于利用菲涅耳波带片作为掩模进行边缘增强的模型, 可以参照螺旋波带片边缘增强技术, 菲涅耳波带片不能在物理空间上进行光学调制, 因而可以在计算重建中引入螺旋滤波进行调制。FZA 透射率函数可以表示为 $T_{\text{FZA}}(r) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi r^2}{r_1^2}\right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} h(r) + \frac{1}{4} h^*(r)$, 进而其前向模型可以表示为

$$S \mathcal{F} I_{\text{holo}} = \frac{1}{4} \mathcal{F}^{-1} H \mathcal{F} O + \frac{1}{4} \mathcal{F}^{-1} H^* \mathcal{F} O + e, \quad (9)$$

$$\mathcal{F} I_{\text{holo}} = \frac{1}{4} H_S \mathcal{F} O_{\text{edge}} + \frac{1}{4} H_S^* \mathcal{F} O_{\text{edge}} + e. \quad (10)$$

在重建过程中使用 $H_S = H/S = i \exp[-i\pi r_1^2(u^2 + v^2)] / \exp[i\theta(\theta + \theta_0)]$ 作为重建传递函数, 可以获得菲涅耳波带片的边缘增强图像; 使用传递函数 H 进行重建, 可以进行成像。菲涅耳波带片边缘增强技术同样可以引入 LG 调制项以获得更高对比度的边缘图像, 体现在传递函数上表示为 $H_{\text{LG}, S} = H/A_{\text{LG}, S} = i \exp[-i\pi r_1^2(u^2 + v^2)] / \left\{ \frac{r}{w_1} \exp\left[-\left(\frac{r}{w_1}\right)^2\right] \times \exp(i\theta) \text{circ}\left(\frac{r}{R}\right) \right\}$ 。

2.3 各向异性边缘增强重建

各向异性无透镜边缘增强方法通过打破各向同性无透镜边缘增强算法模型中螺旋相位的对称性, 在不增加噪声的前提下实现各向异性边缘增强。为了螺旋相位因子的对称性, 在反向传播中取实部或者虚部后再取强度则可以得到各向异性的边缘增强:

$$O_{\text{edge1}} = \text{Re}[O_{\text{edge}}] = \left| \text{Re}\left[4\mathcal{F}^{-1} \frac{1}{H} \mathcal{F} I_{\text{holo}}\right] + e \right|^2, \quad (11)$$

$$O_{\text{edge2}} = \text{Im}[O_{\text{edge}}] = \left| \text{Im}\left[4\mathcal{F}^{-1} \frac{1}{H} \mathcal{F} I_{\text{holo}}\right] + e \right|^2. \quad (12)$$

取实部或虚部实际上影响的是螺旋相位最终起作用的部分, 为此可以通过 $T_{\text{SZA}}(r, \theta)$ 的傅里叶变换进行推导分析。首先根据傅里叶光学, $h_{\text{SZA}}(r, \theta)$ 的傅里叶变换可以表示为 $\mathcal{F}\{h_{\text{SZA}}(r, \theta)\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \times (-i)^k e^{ik\varphi} \mathcal{H}_k[h(r)]$, 其中 k 为整数, (ρ, φ) 为成像面的坐标。 c_k 可以表示为

$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g_\theta(\theta) e^{-ik\theta} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{i(1-k)\theta} d\theta = \delta_{k1} = \begin{cases} 1, & k=1 \\ 0, & k \neq 1 \end{cases} \quad (13)$$

所以 $\mathcal{F}\{h_{\text{SZA}}(r, \theta)\}$ 只有 $k=1$ 时的一项, 将 $h(r)$ 和 $k=1$ 代入 $h(r)$ 的 k 阶 Hankel 变换, 可得

$$\mathcal{H}_1\{h(r)\} = \frac{\pi\rho r_1^3}{2} \times \exp\left[i\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2} - \frac{\pi}{4}\right)\right] \times \left[J_1\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2}\right) - iJ_0\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2}\right) \right], \quad (14)$$

式中: J_0 和 J_1 分别是零阶贝塞尔函数和一阶贝塞尔函数。进一步可以推导得到 $\mathcal{F}\{h_{\text{SZA}}(r, \theta)\}$ 的表达式:

$$\mathcal{F}\{h_{\text{SZA}}(r, \theta)\} = -i \frac{\pi\rho r_1^3}{2} \times \exp(i\varphi) \times \exp\left[i\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2} - \frac{\pi}{4}\right)\right] \times \left[J_1\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2}\right) - iJ_0\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2}\right) \right], \quad (15)$$

同理, 可以得到 $h_{\text{SZA}}^*(r, \theta)$ 的傅里叶变换:

$$\mathcal{F}\{h_{\text{SZA}}^*(r, \theta)\} = -i \frac{\pi\rho r_1^3}{2} \times \exp(-i\varphi) \times \exp\left[-i\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2} - \frac{\pi}{4}\right)\right] \times \left[J_1\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2}\right) + iJ_0\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2}\right) \right], \quad (16)$$

结合式(3)、(15)、(16), 可以得到 $T_{\text{SZA}}(r, \theta)$ 的傅里叶变换:

$$\mathcal{F}\{T_{\text{SZA}}(r, \theta)\} = -\frac{i\pi\rho r_1^3}{4} \left[J_1\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2}\right) \times \cos\left(\varphi + \frac{2\pi\rho^2 r_1^2 - \pi}{4}\right) - iJ_0\left(\frac{\pi\rho^2 r_1^2}{2}\right) \times \sin\left(\varphi + \frac{2\pi\rho^2 r_1^2 - \pi}{4}\right) \right]. \quad (17)$$

通过分析式(17)可以发现, 涡旋存在于实部的余弦函数或者虚部的正弦函数中, 且涡旋的振幅调制项为不同的贝塞尔函数。当最终结果取实部(Re part)或虚部(Im part)时, 所对应的螺旋相位分别为余弦和正弦, 这种非对称性会导致滤波器不再实现各向同性的边缘增强, 而是有方向性的各向异性边缘增强。同时从相似性与互补性来看, 实部和虚部两者角度刚好相差 90° , 最后成像的方向也是相差 90° 。而强度值是实部和虚部的平方和, 因此等向边缘增强实际是两个方向的叠加。

对于菲涅耳波带片的各向异性边缘增强重建, 同样可以采用上述分析。对于菲涅耳波带片在边缘增强重建过程中引入的螺旋相位, 在反向传播重建时取实部虚部实现各向异性边缘增强, 取强度实现各向同性边缘增强。

进一步分析, 对于螺旋波带片的各向异性边缘增强, 结合菲涅耳波带片的边缘增强重建模型, 在恢复重建的过程中对传递函数 H 再引入一个初始相位因子 θ_0 , 即传递函数变为 $H(r, \theta_0) = H / \exp(i\theta_0)$, 能够有效获得感兴趣区域(ROI)的边缘增强图像。与此同时结合取实部或取虚部的正余弦函数, 引入的初始相位因子同样具有周期性。

3 重建结果与分析

3.1 数值仿真结果

在理论分析的基础上, 利用 Matlab 软件对螺旋波带片边缘增强成像进行了数值仿真, 通过选取结果的实部和虚部, 得到各向异性的边缘增强图像。同时在重建过程中引入初始相位因子 θ_0 项, 能够获得不同区域的边缘增强成像。为方便比较和观察, 仿真中输入图像为一个正十六边形的图像, 成像采用传递函数 H_{LG} , 各向同性边缘增强取强度值, 各向异性边缘增强成像分别取反向传播的实部与虚部。图 2(a) 为模拟仿真的原图, 图 2(b) 为传感器所捕获的类全息图, 图 2(c) 为螺旋波带片用于无边缘增强的成像结果, 即采用 H_s 重建, 图 2(d) 为引入 LG 调制项的螺旋波带片的各向同性边缘增强, 图 2(e) 为数值仿真中所使用的 LG 调制项, $\omega_1 = 0.15R'$, R' 为频谱矩阵对角线大小。图 2(f)~(j) 为带有 LG 调制项且初始相位因子 θ_0 分别为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$ 取实部的各向异性边缘增强结果。亮黄色部分是加强的边缘, 与其垂直的边缘被抑制, 以直角坐标系为基准, 图 2(f)~(i) 加强的边缘方向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 方向。随着角度的变化, 图像有明显的边缘增强方向偏转, 且方向偏转和角度变化呈线性关系。同时, 可以通过仿真验证理论分析所提出的初始相位因子对各向异性边缘增强呈现周期性变化, 周期为 π 。

在简单目标仿真的基础上, 进一步对复杂目标进行仿真模拟, 结果如图 3 所示。对于复杂目标, 螺旋波带片在成像和边缘增强成像方面未能够完整充分地复原出图像的细节信息, 孪生像对成像重建过程的影响较为明显。同时由图 3(c) 和图 3(d) 可以看出, 螺旋波带片对复杂目标闭环连通区域的边缘成像效果仍有不俗表现, 对目标的整体轮廓增强较为明显, 对目标梯度变化较缓区域的边缘定位精度较差, 不能够较好复原。同时受掩模板的分辨率限制, 螺旋波带片对复杂目标的细节信息边缘成像效果相较于传统透镜仍有差距。因此非相干光照明的无透镜边缘增强成像系统主要面向于低复杂度的闭环连通目标边缘增强成像, 诸如整块磁瓦的缺陷检测、细胞特定的边缘增强成像等。

进一步仿真分析波带片常数对编码和成像的影响, 结果如图 4 所示。螺旋波带片由菲涅耳波带片和螺旋相位板进行逻辑运算得到, 因而波带片常数决定

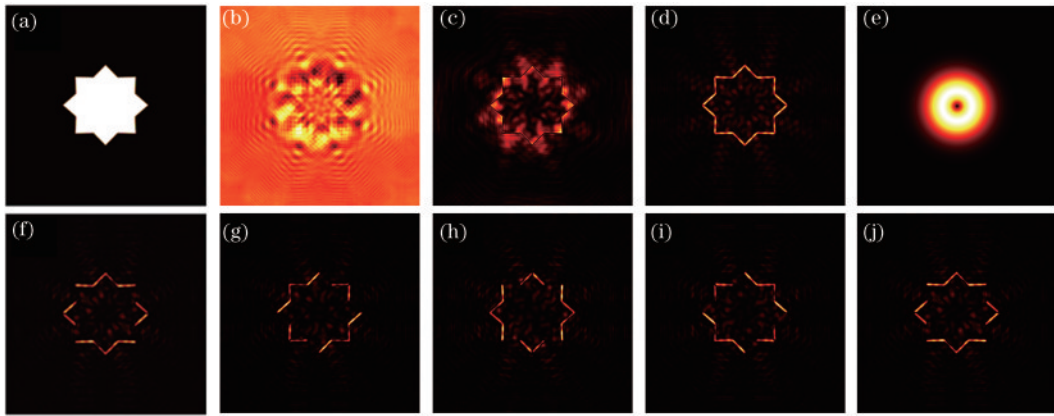


图 2 SZA 边缘增强成像仿真结果。(a)原图;(b)传感器所获的类全息图;(c) H_S 重建成像;(d) H_{LG} 重建成像;(e) LG 调制项;
(f)~(j) $H(r, \theta_0)$ 的初始相位 θ_0 分别为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$ 时进行重建取实部的结果

Fig. 2 SZA edge-enhanced imaging simulation results. (a) Original image; (b) holograph-like image obtained by a sensor; (c) reconstructed image with H_S ; (d) reconstructed image with H_{LG} ; (e) LG modulation term; (f)~(j) Re part of reconstructed images with $H(r, \theta_0)$ in which θ_0 is $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$

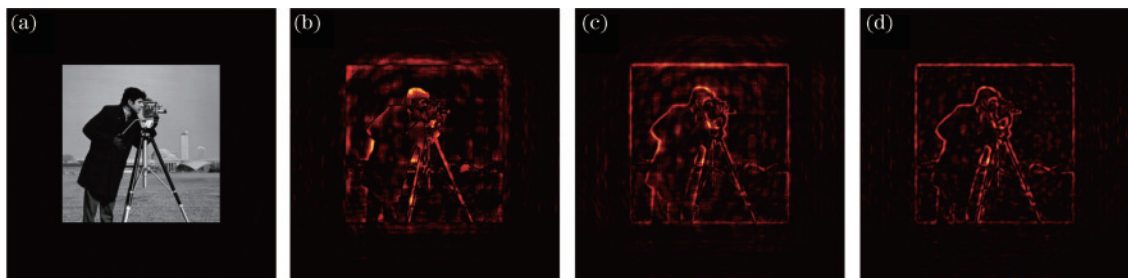


图 3 Cameraman SZA 仿真结果。(a)原图;(b) H_S 重建成像;(c) H 强度成像;(d) H_{LG} 强度成像

Fig. 3 Cameraman SZA simulation results. (a) Original image; (b) reconstructed image with H_S ; (c) intensity part of reconstructed image with H ; (d) intensity part of reconstructed image with H_{LG}

着系统的分辨率。图 4(c) $r_1 = 0.25 \text{ mm}$ 时分辨率板第 5 组 6 号元素较图 4(b) 更清晰, 同时第 6 组 1 号元素尚可区分, 实现边缘增强成像, 而图 4(b) $r_1 = 0.32 \text{ mm}$ 时已经无法有效区分第 6 组 1 号元素。波带片常数越

小, 系统的分辨率越高, 但随着波带片常数的减小, 当 r_1 低于 0.25 mm 时, 系统分辨率会受衍射效应的限制而不会有明显的提升^[3]。

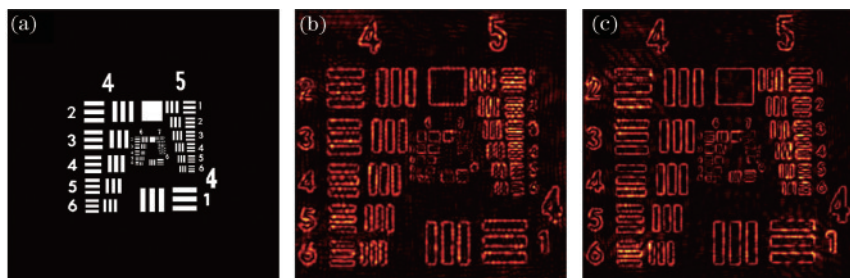


图 4 SZA 不同波带片常数的仿真结果。(a)原图;(b) $r_1 = 0.32 \text{ mm}$; (c) $r_1 = 0.25 \text{ mm}$

Fig. 4 Simulation results of different zone plate constants of SZA. (a) Original image; (b) $r_1 = 0.32 \text{ mm}$; (c) $r_1 = 0.25 \text{ mm}$

3.2 实验结果与分析

为了验证图像边缘增强算法对实际物体拍摄图像的边缘增强效果, 采用型号为 QHY163M 的图像传感器, 传感器的像素间距为 $3.8 \mu\text{m}$, 像素数量为 4656×3522 。显示屏是型号为 ipad2019, 分辨率为 2160×1620 的液晶屏幕, 距离掩模板 300 mm , 在实验中同时作为目标物体和非相干光源。掩模板距离传感

器 3 mm 。实验所用掩模板的加工精度均为 $1 \mu\text{m}$, 掩模板实际是半径为 6 mm 的圆形区域。采用激光直写技术在厚度为 2 mm 的钠钙玻璃衬底上制作掩模板; 利用真空蒸发法在衬底上沉积一层约 140 nm 厚的铬层, 铬层的表面被氧化, 以达到减反射的目的; 然后在铬层上旋涂光致抗蚀剂层 ($1 \mu\text{m}$ 厚), 该空白光掩模在扫描激光束下曝光, 以在光致抗蚀剂层中产生潜像; 曝

光后,可以在显影剂(体积分数为5%~7%的氢氧化钠溶液)中去除未曝光的光致抗蚀剂部分;随后,将其浸泡在腐蚀剂 $[(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6 + \text{HClO}_4]$ 溶液中,铬层的开放区域被蚀刻掉以形成透明区,而被光致抗蚀剂保护的铬层没有被蚀刻以形成不透明区;最后,通过将其浸泡在高浓度显影剂中,来剥离剩余的光致抗蚀剂。

首先进行无透镜边缘增强成像和透镜边缘成像的对比,如图5所示,对目标“DUCK”进行螺旋波带片边缘增强成像和手机拍摄后采用Canny算子进行边缘提取。其中,螺旋波带片常数 r_1 为0.32 mm, LG项中的 $w_1 = 0.1R'$ 。采用Canny算子对手机拍摄图进行边缘提取,如图5(b)所示,图像边缘提取受背景噪声影响较大。如图5(d)所示,无透镜边缘增强成像能够有效去除背景噪声,获得更高对比度的边缘增强图像。同时,无透镜成像系统较透镜系统结构简单、体积更小、成本更低,能够仅通过一套无透镜成像系统获得多模式的成像,能够在微型机器人等领域有更多的应用。

图6为基于螺旋波带片的无透镜边缘增强成像,螺旋波带片常数 r_1 为0.32 mm。物体为五角星,其径向方向包含了所有角度,便于探究不同方向边缘增强的结果。通过取反向传播的强度、实部、虚部,可以有效获得各向同性、各向异性的边缘增强图像;同时,引入 LG 振幅调制项,能够有效提升重建对比度。此处 LG 项中的 $w_1 = 0.1R'$ 。图6(a)~(c)为分别取反向传

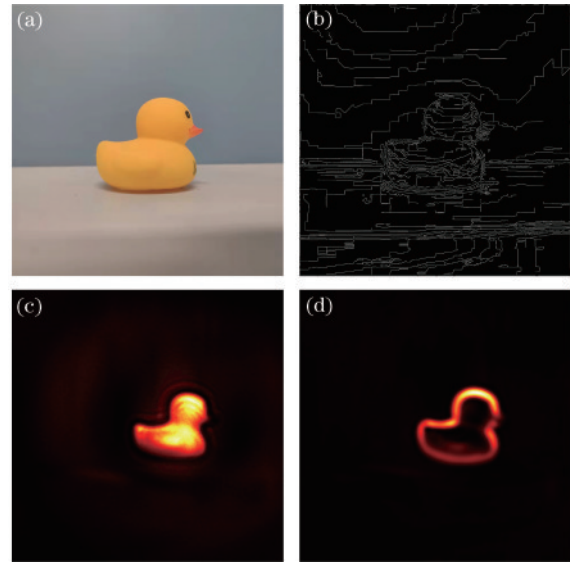


图5 无透镜成像系统与透镜系统对比。(a)手机拍摄图;(b)边缘提取;(c)无透镜成像重建;(d)无透镜边缘增强成像
Fig. 5 Lensless imaging system vs. lens system. (a) Mobile phone photo; (b) edge extraction; (c) lensless imaging; (d) edge-enhanced lensless imaging

播的实部、虚部及强度的结果,图6(a)和图6(b)实现了各向异性的边缘增强,这与数值仿真表现一致。同时,结合图6(d)~(f)可以得到,反向传播过程中引入的 LG 调制项能够抑制低频噪声,有效提升重建图像的对比度。

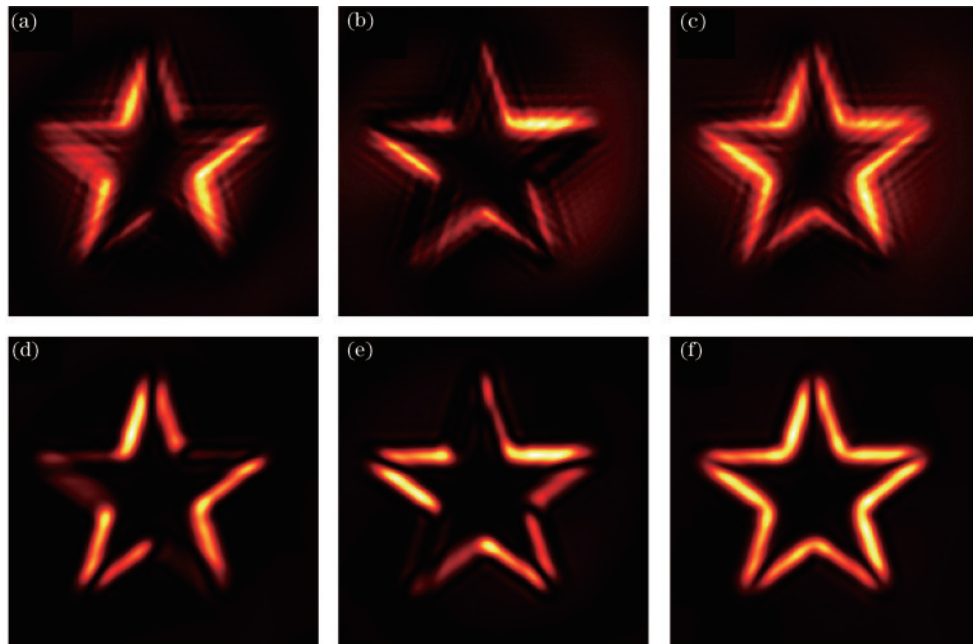


图6 SZA重建图像。(a)取实部;(b)取虚部;(c)取强度;(d)~(f)对应引入 LG 调制项的重建结果
Fig. 6 SZA reconstructed images. (a) Re part; (b) Im part; (c) Intensity part; (d)~(f) corresponding reconstruction results by introduction of LG modulation term

在实现各向同性、各向异性边缘增强的基础上,选物体“SIGS”开展实验,目标整体尺寸为 $3.4\text{ cm} \times 9.4\text{ cm}$,其中字母“I”线宽为4.4 mm。螺旋波带片常数 r_1 为

0.32 mm, LG 项中的 $w_1 = 0.1R'$ 。通过调整初始相位因子,可以起到定向选择边缘增强的效果,如图7所示,螺旋波带片通过后端的计算重建调制,能够针对性地选择

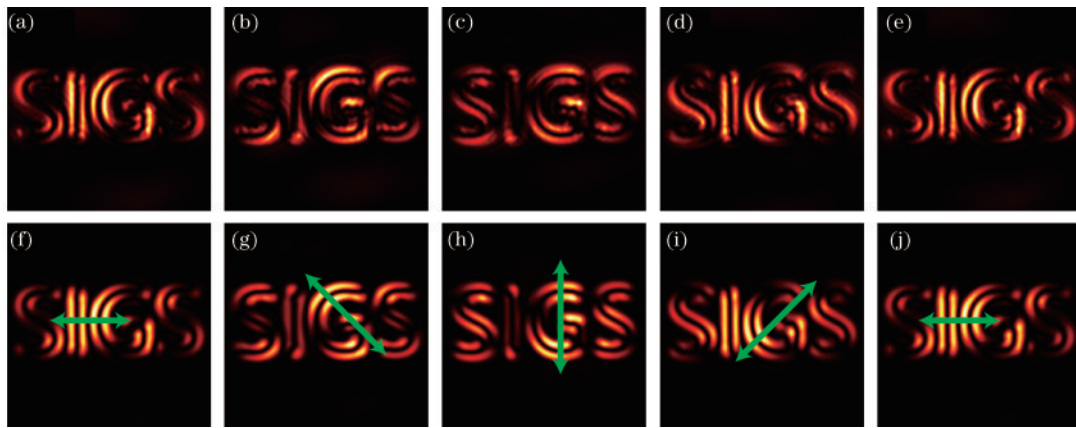


图 7 SZA 各向异性边缘增强结果。(a)~(e) $H(r, \theta_0)$ 的初始相位 θ_0 分别为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$ 时进行重建取实部的结果；(f)~(j) 对应引入 LG 调制项的重建结果

Fig. 7 SZA anisotropic edge enhancement results. (a)~(e) Re part of reconstructed images with $H(r, \theta_0)$ in which θ_0 is $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$; (f)~(j) corresponding reconstruction results by introduction of LG modulation term

ROI 进行边缘增强。同时由图 7(f)~(j) 可以得出初始相位因子对各向异性边缘增强的调制周期为 π ，这与数值仿真模拟结果一致。这为后续针对 ROI 的边缘增强提供了有效手段，在定向缺陷检测、细胞识别等领域均有可应用空间。

进一步，将菲涅耳波带片和螺旋波带片作为掩模，进行边缘增强重建对比分析，结果如图 8 所示，选用的菲涅耳波带片和螺旋波带片常数 r_1 均为 0.32 mm ， $w_1 = 0.1R'$ 。通过对物体“SIGS”进行成像和边缘增强重建处理可以看出，菲涅耳波带片和螺旋波带片均能够获得高对比度的边缘增强图像。如图 8(a) 和图 8(d) 所示，在成像上，菲涅耳波带片的重建伪影较螺旋波带片的重建伪影少，菲涅耳波带片略优于螺旋波带片；如图 8(b) 和图 8(e) 所示，在边缘增强方面，螺

旋波带片边缘周围的伪影较少，边缘定位更为精确，略优于菲涅耳波带片，螺旋波带片通过在空域中直接对光线进行调制，相较于后端的计算重建更有优势一些。同时，如图 8(c) 和图 8(f) 所示，在 LG 调制项的作用下，图 8(b) 和图 8(e) 中的伪影均被有效去除，获得高对比度的边缘增强图像。图 9 展示了图 8 中的截线部分的强度分布情况。在获得重建结果的基础上，采用半峰全宽 (W_{FWHM}) 来衡量成像和边缘增强成像的效果。在归一化后，若半峰全宽越小，则说明成像或边缘增强成像的定位精度越高，效果越好。从图 9 可以看出，对于具有同一波带片常数的菲涅耳波带片和螺旋波带片，在截线处的成像与边缘增强成像效果差异很小。为进一步分析，对成像波峰和边缘增强波峰进行了定量分析，结果如表 1 所示。



图 8 FZA 和 SZA 重建对比。(a)~(c) FZA 采用 $H, H_S, H_{LG,S}$ 重建的强度；(d)~(f) SZA 采用 H_S, H, H_{LG} 重建的强度
Fig. 8 Comparison of FZA and SZA reconstructions. (a)~(c) Intensity of FZA reconstructed images with $H, H_S, H_{LG,S}$; (d)~(f) intensity of SZA reconstructed images with H_S, H, H_{LG}

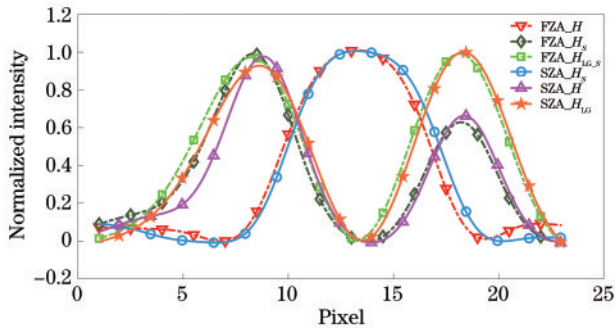


图 9 图 8 中截线处的强度分布

Fig. 9 Intensity distribution along the line in Fig. 8

表 1 图 8 中截线处对应的边缘宽度

Table 1 Side width corresponding to the line in Fig. 8

Condition	$W_{\text{FWHM}}/\text{pixel}$		Average $W_{\text{FWHM}}/\text{pixel}$
	Left	Right	
FZA_H	6.96		6.96
FZA_H _s	4.69	3.84	4.27
FZA_H _{LG,s}	5.54	4.88	5.21
SZA_H _s	7.05		7.05
SZA_H	4.30	3.72	4.01
SZA_H _{LG}	5.50	4.80	5.15

从表 1 可知:在成像方面,菲涅耳波带片成像的半峰全宽为 6.96 pixel,较螺旋波带片,在成像的图像边界定位上提升了 1.3%;在边缘增强方面,螺旋波带片的左右波峰的半峰全宽均值为 4.01 pixel,较菲涅耳波带片,在边缘定位上提升了 6%,对应的 LG 调制项的结果也提升了 1.2%。同时,引入的 LG 调制项成功地抑制了低频噪声,提升了对比度,更好地将能量重新分配到边缘上,边缘宽度较未引入调制项的边缘增强有明显提升,并且结合图 9 可知,调制项能够有效解决螺旋滤波天然带来的左右波峰强度不均匀的问题,以获得更加均匀的各向同性边缘增强图像。

4 结 论

提出了一种基于螺旋波带片的无透镜编码边缘增强成像技术,构建了面向非相干光照明的无透镜编码边缘增强重建模型,获取了更突出边界信息的解码图像。详细推导了基于螺旋相位实现各向同性增强、各向异性增强的成像方法,通过数值模拟和实验验证两个方面验证了该技术实现无透镜编码边缘增强成像的可行性。分析了螺旋相位初始相位因子对各向异性边缘增强的周期性影响,对菲涅耳波带片和螺旋波带片成像和边缘增强成像进行了定量分析。实验结果表明,所提方法能够快速有效地获取可选择性的边缘增强图像,为后续开发无透镜编码缺陷检测系统奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Boominathan V, Robinson J T, Waller L, et al. Recent advances in lensless imaging[J]. *Optica*, 2022, 9(1): 1-16.
- [2] Chen Y F, Zhao H C, Mao J, et al. Controlled flight of a micro-robot powered by soft artificial muscles[J]. *Nature*, 2019, 575(7782): 324-329.
- [3] Wu J C, Zhang H, Zhang W H, et al. Single-shot lensless imaging with Fresnel zone aperture and incoherent illumination[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 53.
- [4] Wu J C, Cao L C. Fresnel zone aperture lensless imaging by compressive sensing (Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 267-276.
- [5] Barrett H, Horrigan F A. Fresnel zone plate imaging of gamma rays: theory[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(11): 2686-2702.
- [6] Asif M S, Ayremlou A, Sankaranarayanan A, et al. FlatCam: thin, lensless cameras using coded aperture and computation[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, 3(3): 384-397.
- [7] DeWeert M J, Farm B P. Lensless coded-aperture imaging with separable Doubly-Toeplitz masks[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(2): 023102.
- [8] Chen P D, Su X Q, Liu M Y, et al. Lensless computational imaging technology using deep convolutional network[J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2661.
- [9] Zhou H, Feng H J, Hu Z X, et al. Lensless cameras using a mask based on an almost perfect sequence through deep learning[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 30248-30262.
- [10] Antipa N, Kuo G, Heckel R, et al. DiffuserCam: lensless single-exposure 3D imaging[J]. *Optica*, 2018, 5(1): 1-9.
- [11] Liu F L, Kuo G, Antipa N, et al. Fourier DiffuserScope: single-shot 3D Fourier light field microscope with a diffuser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 28969-28986.
- [12] Monakhova K, Yurtsever J, Kuo G, et al. Learnt reconstructions for practical mask-based lensless imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28075-28090.
- [13] Wu J C, Cao L C, Barbastathis G. DNN-FZA camera: a deep learning approach towards broadband FZA lensless imaging[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(1): 130-133.
- [14] Tajima K, Shimano T, Nakamura Y, et al. Lensless light-field imaging with multi-phased Fresnel zone aperture[C]//2017 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), May 12-14, 2017, Stanford, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [15] Antipa N, Oare P, Bostan E, et al. Video from stills: lensless imaging with rolling shutter[C]//2019 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), May 15-17, 2019, Tokyo, Japan. New York: IEEE Press, 2019.
- [16] Adams J K, Yan D, Wu J M, et al. *In vivo* lensless microscopy via a phase mask generating diffraction patterns with high-contrast contours[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2022, 6(5): 617-628.

- [17] Hua Y, Nakamura S, Asif M S, et al. SweepCam-depth-aware lensless imaging using programmable masks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(7): 1606-1617.
- [18] Boominathan V, Adams J K, Robinson J T, et al. PhlatCam: designed phase-mask -based thin lensless camera[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(7): 1618-1629.
- [19] Adams J K, Boominathan V, Avants B W, et al. Single-frame 3D fluorescence microscopy with ultraminiature lensless FlatScope[J]. Science Advances, 2017, 3(12): e1701548.
- [20] Monakhova K, Yanny K, Aggarwal N, et al. Spectral DiffuserCam: lensless snapshot hyperspectral imaging with a spectral filter array[J]. Optica, 2020, 7(10): 1298-1307.
- [21] Shimano T, Nakamura Y, Tajima K, et al. Lensless light-field imaging with a Fresnel zone aperture: quasi-coherent coding[J]. Applied Optics, 2018, 57(11): 2841-2850.
- [22] Xu T X, He J R, Ren H, et al. Edge contrast enhancement of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) microscopy by spatial light modulator aided spiral phase modulation[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 29207-29215.
- [23] Zhou L Y, Huang X W, Fu Q, et al. Fine edge detection in single-pixel imaging[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(12): 121101.
- [24] Fürhapter S, Jesacher A, Bernet S, et al. Spiral phase contrast imaging in microscopy[J]. Optics Express, 2005, 13(3): 689-694.
- [25] Sakdinawat A, Liu Y W. Soft-X-ray microscopy using spiral zone plates[J]. Optics Letters, 2007, 32(18): 2635-2637.
- [26] Anand V, Katkus T, Ng S H, et al. A review of Fresnel incoherent correlation holography with linear and non-linear correlations[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(2): 020501.
- [27] 范全平, 王少义, 魏来, 等. 一种产生边缘增强图像的螺旋波带片编码成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031003.
- Fan Q P, Wang S Y, Wei L, et al. Spiral zone plate-coded imaging technique with edge enhancement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031003.
- [28] Fang J C, Li J P, Kong A R, et al. Optical orbital angular momentum multiplexing communication via inversely-designed multiphase plane light conversion[J]. Photonics Research, 2022, 10(9): 2015-2023.
- [29] Davis J A, McNamara D E, Cottrell D M, et al. Image processing with the radial Hilbert transform: theory and experiments[J]. Optics Letters, 2000, 25(2): 99-101.
- [30] Guo C S, Han Y J, Xu J B, et al. Radial Hilbert transform with Laguerre-Gaussian spatial filters[J]. Optics Letters, 2006, 31(10): 1394-1396.