

基于光学扫描全息系统的边缘提取技术

杨力¹, 楼宇丽^{1*}, 李重光¹, 王仁德¹, 王华英², 董昭², 桂进斌¹, 宋庆和¹, 刘庆伟¹

¹昆明理工大学理学院激光信息处理技术与应用重点实验室, 云南 昆明 650500;

²河北工程大学数理科学与工程学院, 河北 邯郸 056038

摘要 提出了两种光瞳在光学扫描全息系统中实现边缘提取的方法, 基于双光瞳外差检测来获取物体的全息信息。首先, 采用 LG 光束-轴锥镜光瞳和小孔滤波器作为两个光瞳构建复合光场, 并对物体进行扫描, 提取边缘信息; 其次, 在小孔滤波器不变的情况下, 采用幂函数分布的振幅型光瞳作为另一种光瞳, 完成边缘信息的提取。计算机仿真实验结果表明, 使用本文所述的两种光瞳相比使用环形光瞳时实现的边缘提取质量均有提升, 且无须进行数字图像处理, 简化了实验步骤。

关键词 全息; 光学扫描全息; 光瞳; 边缘提取; 振幅型光瞳

中图分类号 O438.1 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.230901

Edge Extraction Technologies Based on an Optical Scanning Holographic System

Yang Li¹, Lou Yuli^{1*}, Li Chongguang¹, Wang Rende¹, Wang Huaying², Dong Zhao²,
Gui Jinbin¹, Song Qinghe¹, Liu Qingwei¹

¹Key Laboratory of Laser Information Processing Technology and Application, College of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;

²School of Mathematics & Physics Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

Abstract Two methods for the edge extraction of optical pupils in optical scanning holographic systems were proposed, and the holographic information of objects was obtained based on double pupil heterodyne detection. First, LG beam-axis cone lens pupil and aperture filter were used as two pupils to form a composite light field, which was able to scan the object to extract edge information. Second, when the aperture filter was unchanged, the other pupil used a power amplitude-type pupil with function distribution and edge information extraction. Computer simulation experiments show that the edge extraction qualities of the two pupils described in this paper are improved in comparison with the use of a ring pupil, and digital image processing is not required, which simplifies the experimental steps.

Key words holography; optical scanning holography; pupil; edge extraction; amplitude-type pupil

OCIS codes 090.1995; 100.2980; 110.2650

1 引言

数字全息术是数字处理技术和光学全息技术的结合, 通常使用电荷耦合元件代替传统的全息记录材料记录全息图, 并将其输入到计算机, 然后由计算

机进行数字重建^[1-2]。光学扫描全息术(OSH)是一种特殊的数字全息技术^[3], 可通过双光瞳外差扫描技术实现全息信息的记录。相较于传统的数字全息术而言, OSH 使用非相干的方式进行记录^[4-5], 此特性可以应用于荧光扫描全息显微镜中^[6-7], 扩展了数

收稿日期: 2020-03-25; 修回日期: 2020-04-05; 录用日期: 2020-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61465005, 61540075, 61565011)、河北科技计划项目(16273901D)

* E-mail: 578928841@qq.com

字全息术的适用范围。

在传统的 OSH 系统中,通常采用具有一定差频的两束光学信号,通过干涉合束器产生菲涅耳波带板型的结构光,对物体进行二维扫描,获得物体的全息信息,然后利用光电探测器采集全息信息,并输入至电路解调系统中实现全息图的输出,最后通过计算机实现对全息图的记录和数字重建。在 OSH 系统中,两束光学信号中分别插入了一个光瞳,可以实现对干涉条纹的预调制。通过改变两个光瞳的类型,可以实现不同的成像效果。Dobsin 等^[8]使用高斯环代替其中一个光瞳,使目标的边缘得到增强,实现了全息图的实时处理,但是成像效果较为模糊且实现过程较为复杂;另外,还有一部分学者使用时变涡旋光束进行边缘提取,例如使用螺旋相位板作为其中一个光瞳^[9-11],对比高斯环作为光瞳的结果,可以发现使用螺旋相位板时边缘提取效果较好,但其噪声将会随光强的增强而增强,故提取效果难免会受到影响。

本文介绍了两种光瞳应用于 OSH 系统中实现边缘提取的方法。第一种为拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束^[12-14]经过轴锥镜产生高阶贝塞尔光束的光瞳。轴锥镜是一种非球面线聚焦的光学透镜,当一束平行光束入射时可产生类无衍射的零阶贝塞尔光束^[15-16],此光束经透镜整形后可以产生局域空心光束^[17],但实际上此光束中心光强并不为零,因此使用 LG 光束代替平行光束, LG 光束通过轴锥镜后产生高阶贝塞尔光束^[18-19],使局域空心光束中心始终存在奇点,光强为零。通过傅里叶光学中的角谱衍射理论可知,物光波在空域中传播到衍射屏的过程,相当于光在频域中通过有限半径的低通滤波器^[20-21]的滤波过程,即光波通过透镜时,透镜的中间部分为低频区域,边缘部分为高频区域,当使用局域空心光束时,透镜低频区域的光被遮挡,只有高频区域的光参与成像,物体的边缘信息被提取出来,增加了成像的清晰度。例如,浙江大学的支绍韬等^[22-23]通过采用环形孔径和暗视场的方法,在提取物体边缘的同时使用暗场背景,提高了光学显微镜的分辨率和对比度。第二种为幂函数分布的振幅型光瞳^[24],此光瞳的振幅透过率随半径呈幂函数分布,在光学成像中可以用来调制波前实现光斑压缩,能显著改善成像质量,提高分辨率。两种光瞳应用于扫描全息中,可以在一定程度上提高边缘提取的成像质量,降

低噪声的影响。

2 光学扫描全息系统的基本原理

2.1 传统的光学扫描全息系统

图 1 为 OSH 系统的典型方案。其中,两个反射镜(M1, M2)和两个分束镜(BS1, BS2)共同构成 Mach-Zehnder 干涉光路,其中两个扩束准直系统(BE1, BE2)对光束起到扩束准直滤波的作用。角频率为 ω_0 的激光束被 BS1 分成两束。经 BS1 的透射光通过调谐频率为 Ω 的声光移频器(AOFS)后,频率上升至 $\omega_0 + \Omega$,然后通过光瞳 p_2 ,另一束反射光直接通过光瞳 p_1 ,光瞳 p_1 和 p_2 均放置于透镜 L1 的前焦面。两束光通过 BS2 合束后干涉产生预处理的结 构光,投射到位于二维扫描载物台(x - y scanner)的三维物体上,通过二维扫描载物台在垂直面上的移动,可以实现对物体的二维扫描。

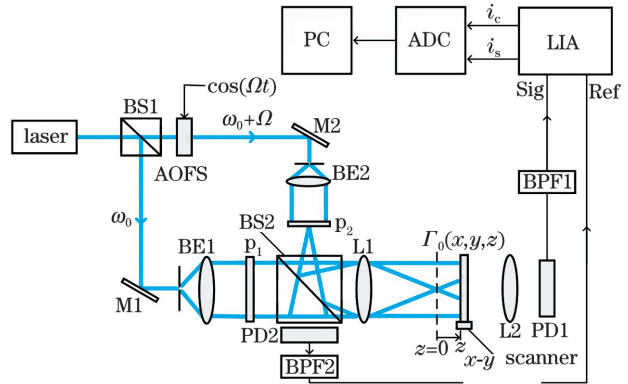


图 1 OSH 系统原理图

Fig. 1 Schematic of OSH system

被扫描的物体放置于二维扫描载物台上,其振幅透过率函数表示为 $\Gamma_0(x, y; z)$ 。透镜(L2)将透射光或散射光收集到光电探测器(PD1),此时的电信号由基带(直流)电流和外差电流组成。通过调谐频率为 Ω 的带通滤波器(BPF1),滤除直流电流,只让外差电流通过。外差电流进入锁相放大器内(LIA)进行信号解调,锁相放大器由乘法器和低通滤波器两部分组成,锁相放大器的参考信号与外差频率相同,由另一个固定的光电探测器(PD2)采集并通过带通滤波器(BPF2)后提供, BPF2 的调谐频率也是 Ω 。外差信号分两路进入乘法器,分别与相互正交的两路信号 $\cos(\Omega t)$ 和 $\sin(\Omega t)$ 混频,再通过低通滤波器后便可以解调和提取出同向分量与正交分量,此时两路输出的电信号分别为正弦全息图 $[H_{\sin}(x, y)]$ 和余弦全息图 $[H_{\cos}(x, y)]$ 。最后,两路信号经过模数转换器(ADC)后储存在计算机

(PC)中。

整个双光瞳光学外差扫描系统的光学传递函数可以表示为^[25]

$$\text{OTF}(k_x, k_y; z) = \exp\left[\frac{jz}{2k_0}(k_x^2 + k_y^2)\right] \times \iint p_1^*(x', y') p_2\left(x' + \frac{f}{k_0}k_x, y' + \frac{f}{k_0}k_y\right) \times \exp\left[\frac{jz}{f}(x'k_x + y'k_y)\right] dx' dy', \quad (1)$$

式中: j 为虚数, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 为波数, λ_0 为激光器的波长, k_x 和 k_y 分别表示 x 、 y 的频域坐标, p_1 和 p_2 分别表示两个光瞳函数, x' 和 y' 分别表示横向和纵向的积分变量, $*$ 号表示取共轭, f 为 L1 的焦距。

在传统的扫描全息系统中, 两个光瞳函数分别为

$$p_1(x, y) = 1, \quad (2)$$

$$p_2(x, y) = \delta(x, y), \quad (3)$$

将(2)式和(3)式代入(1)式中, 系统的光学传递函数变为

$$\text{OTF}(k_x, k_y; z) = \exp\left[-\frac{jz}{2k_0}(k_x^2 + k_y^2)\right]. \quad (4)$$

在计算机中对正弦全息图和余弦全息图进行复数加法可以得到光学扫描全息系统的复全息图, 即

$$H_c(x, y) = H_{\cos}(x, y) + jH_{\sin}(x, y) = \int \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{|\Gamma_0(x, y; z)|^2\} \text{OTF}(k_x, k_y; z)\} dz = \int \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\{|\Gamma_0(x, y; z)|^2\} \exp\left[-\frac{jz}{2k_0}(k_x^2 + k_y^2)\right]\right\} dz \quad (5)$$

式中, $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ 和 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 分别表示傅里叶逆变换与傅里叶变换, z 为物体与透镜 L1 后焦面之间的距离, 因此对 z 的积分, 也就是沿着物体的深度, 对物体的三维信息进行记录。

对于复全息图基本的重建算法, 只需与空间脉冲响应函数作卷积运算即可, 即

$$R_{\text{image}} = H_c(x, y) \otimes h(x, y; z) = \int \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{H_c(x, y)\} \text{OTF}^*(k_x, k_y; z)\} dz, \quad (6)$$

式中, \otimes 表示卷积, $h(x, y; z)$ 表示空间脉冲响应是 OTF 的傅里叶逆变换。

2.2 改进方案

2.2.1 使用 LG 光束-轴锥镜光瞳

本文所使用的第一种光瞳为 LG 光束-轴锥镜光瞳, 即: 光瞳函数 $p_{11}(x, y)$ 为 LG 光束经过轴锥

镜产生高阶贝塞尔光束的光瞳^[26-27]; 另一个光瞳函数 $p_{21}(x, y)$ 采用小孔滤波器产生的点光源。该 OSH 系统的两个光瞳函数分别表示为

$$p_{11}(x, y) = i(x, y; z_0) \propto z_0^{2n+1} \exp(-2z_0^2/z_{\text{max}}^2) \times J_n^2(k_0 \sqrt{x^2 + y^2}), \quad (7)$$

$$p_{21}(x, y) = \delta(x, y), \quad (8)$$

式中: z_0 表示沿着光轴方向与轴锥镜顶角之间的距离, $z_{\text{max}} \approx w_0/(n_0 - 1) \tan \alpha$ 是类无衍射光的最大准直距离, w_0 为入射到轴锥镜的光束半径, n_0 为轴锥镜的材料折射率, α 为轴锥镜的底角; $J_n(\cdot)$ 表示 n 阶贝塞尔函数。

将(7)式和(8)式代入(1)式中, 可得系统的光学传递函数为

$$\text{OTF}(k_x, k_y; z) = \exp\left[-\frac{jz}{2k_0}(k_x^2 + k_y^2)\right] \times I^*\left(-\frac{fk_x}{k_0}, -\frac{fk_y}{k_0}; z_0\right), \quad (9)$$

式中: I 为 i 的傅里叶变换。

将(9)式代入(5)式中, 可得复全息图为

$$H_c(x, y) = \int \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\{|\Gamma_0(x, y; z)|^2\} \times \exp\left[-\frac{jz}{2k_0}(k_x^2 + k_y^2)\right] \times I^*\left(-\frac{fk_x}{k_0}, -\frac{fk_y}{k_0}; z_0\right)\right\} dz. \quad (10)$$

本文模拟实验记录的物体为带有字母的薄透光片, 此时 $|\Gamma_0(x, y; z)|^2 = O(x, y) \delta(z - z_1)$, 其中 $O(x, y)$ 为物体光强, z_1 为透镜 L1 后焦面与待测物体的实际距离, 将其代入(11)式中, 可得复全息图为

$$H_1(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\{O(x, y)\} \times \exp\left[-\frac{jz}{2k_0}(k_x^2 + k_y^2)\right] \times I^*\left(-\frac{fk_x}{k_0}, -\frac{fk_y}{k_0}; z_0\right)\right\}. \quad (11)$$

2.2.2 使用幂函数分布的振幅型光瞳

本文所使用的第二种光瞳为幂函数分布的振幅型光瞳, 即: 光瞳函数 $p_{12}(x, y)$ 为振幅透过率随半径呈幂函数分布的振幅型光瞳; 另一个光瞳函数 $p_{22}(x, y)$ 依然采用小孔滤波器产生的点光源。因此该 OSH 系统的两个光瞳函数分别表示为

$$p_{12}(x, y) = \frac{\text{circ}(\sqrt{x^2 + y^2}/w_0)}{(\sqrt{x^2 + y^2}/w_0)^{n_0}}, \quad (12)$$

$$p_{22}(x, y) = \delta(x, y), \quad (13)$$

式中: $\text{circ}(\cdot)$ 为圆孔的透过率函数, n_0 为幂次。光强随幂次的增大而减弱。

将(12)式和(13)式代入(1)式中, 可得系统的光学传递函数为

$$\text{OTF}(k_x, k_y; z) = \exp\left[-\frac{jz}{2k_0}(k_x^2 + k_y^2)\right] \times \frac{\text{circ}\left(\sqrt{\left(\frac{fk_x}{k_0}\right)^2 + \left(\frac{fk_y}{k_0}\right)^2} / \omega_0\right)}{\left(\sqrt{\left(\frac{fk_x}{k_0}\right)^2 + \left(\frac{fk_y}{k_0}\right)^2} / \omega_0\right)^{n_0}}, \quad (14)$$

再将(14)式代入(5)式中, 并考虑到 $|\Gamma_0(x, y; z)|^2 = O(x, y)\delta(z - z_1)$, 可得复全息图为

$$H_2(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\{O(x, y)\} \exp\left[-\frac{jz}{2k_0}(k_x^2 + k_y^2)\right] \times \frac{\text{circ}\left(\sqrt{\left(\frac{fk_x}{k_0}\right)^2 + \left(\frac{fk_y}{k_0}\right)^2} / \omega_0\right)}{\left(\sqrt{\left(\frac{fk_x}{k_0}\right)^2 + \left(\frac{fk_y}{k_0}\right)^2} / \omega_0\right)^{n_0}}\right\}. \quad (15)$$

3 仿真实验与分析

3.1 使用环形光瞳实现边缘提取

为了更好地验证本文方法的有效性和可行性, 将环形光瞳在 OSH 系统中的结果与本文结果进行比较。使用环形光瞳 OSH 系统的两个光瞳分别采用环形光瞳与小孔滤波器^[28], 即

$$p_{13}(x, y) = \text{circ}(\sqrt{x^2 + y^2} / r_o) - \text{circ}(\sqrt{x^2 + y^2} / r_i), \quad (16)$$

$$p_{23}(x, y) = \delta(x, y), \quad (17)$$

式中: r_o 和 r_i 分别为环形光瞳的外径和内径。激光器输出波长为 632.8 nm, L1 的后焦面到物体的距离为 75 mm, 图 2 所示为使用环形光瞳时 OSH 系统的实验结果。图 2(a) 为分辨率 2048 pixel \times 2048 pixel 含有字母“O”的透光片。基于文献[28]的分析, 可知采用孔径比 $\epsilon = 0.5$ 的环形光瞳可以实现较好的边缘提取, 如图 2(b) 所示, 其中白色部分的振幅透过率为 1, 黑色部分为 0, 孔径比是指环形光瞳的内径与外径的比值, 表示为 $\epsilon = r_i / r_o$ 。图 2(c) 为复全息图的再现像。

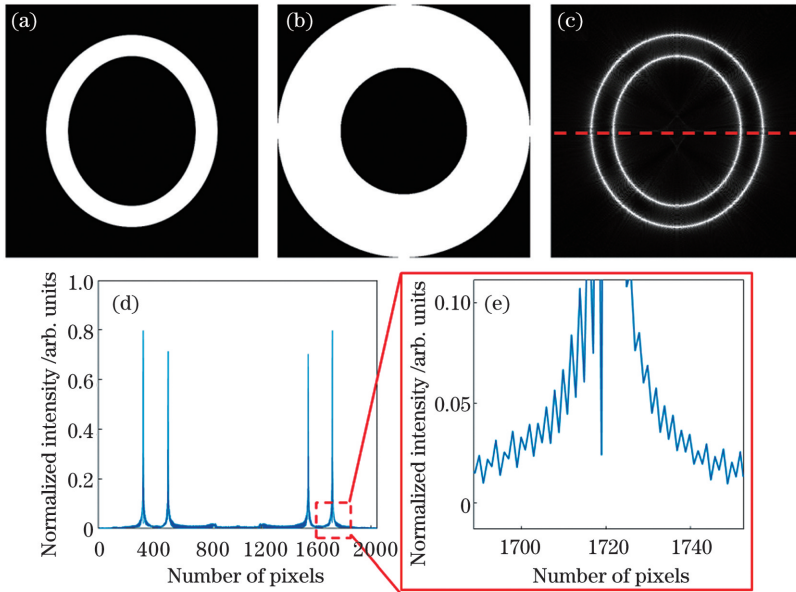


图 2 使用环形光瞳时 OSH 系统的实验结果。(a) 原始物体; (b) 环形光瞳 ($\epsilon = 0.5$) 的透过率分布; (c) 复全息图再现像; (d) 图 2(c) 中虚线位置的归一化强度; (e) 局部归一化强度

Fig. 2 Experimental results of OSH system with annular pupil. (a) Original object; (b) transmittance distribution of annular pupil ($\epsilon = 0.5$); (c) reconstruction image of complex hologram; (d) normalized intensity of the position of the dotted line in Fig. 2 (c); (e) local normalized intensity

从图 2 中可以看出, 与传统 OSH 系统的结果相比^[29], 通过替换其中的一个光瞳, 可以实现物体边缘的信息提取, 但从图 2(c)~图 2(e)可以看出,

所提取的物体边缘信息的周围有明显的噪声, 这可能是由于平行光束照射在环形光瞳的边缘时, 发生了衍射效应, 从而影响了后续扫描物体的成像质量

所致。为了方便观察,往往还需要在后期进行数字图像滤波处理,以降低噪声的影响,这会增加重建算法的运行时间,导致无法实现实时处理。

3.2 改进方案

3.2.1 使用 LG 光束-轴锥镜光瞳

为了改善边缘提取质量并简化实验步骤,本文提出的第一种光瞳采用 LG 光束-轴锥镜光瞳代替环形光瞳。当使用平行光束通过轴锥镜-透镜系统后,所产生的环形光束的轴上位置始终含有一定的光强,且轴上位置属于低频成分,不利于边缘提取,因此选择 LG 光束代替平行光束。当 LG 光束通过

轴锥镜时,轴上为相位奇点,光强为零^[30],产生了高阶贝塞尔光束。高阶贝塞尔光束为局域空心光束,且在一定范围内同样具有类无衍射特性,能量利用率较高,在实验中不仅能减少对激光器功率的依赖,同时因为其衍射效应很弱,能减小衍射带来的噪声影响,改善成像质量。保持其他参数不变,采用 LG 光束-轴锥镜光瞳产生相同孔径比($\epsilon = 0.5$)的空心光束,并对同一幅图片进行实验。图 3 所示为使用 LG 光束-轴锥镜光瞳时 OSH 系统的实验结果,图 3(a)为 $\epsilon = 0.5$ 的 LG 光束-轴锥镜光瞳的透过率分布,图 3(b)为复全息图的再现像。

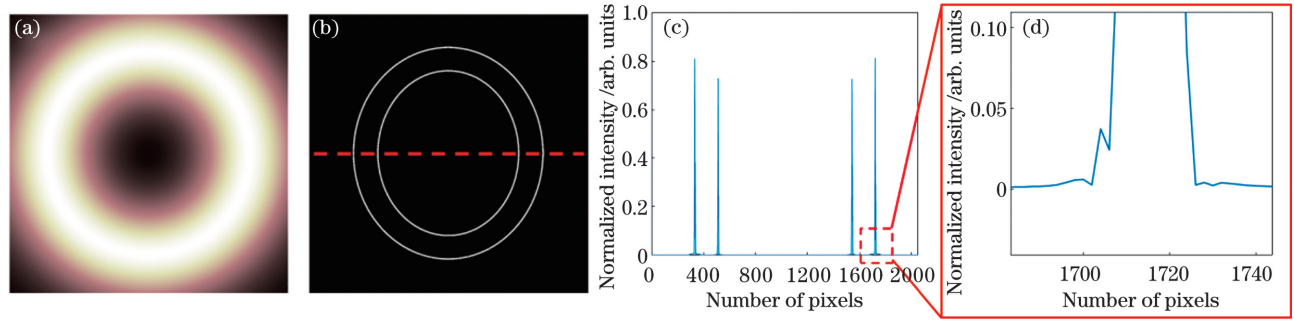


图 3 使用 LG 光束-轴锥镜光瞳时 OSH 系统的实验结果。(a) LG 光束-轴锥镜光瞳($\epsilon = 0.5$)的透过率分布;
(b)复全息图再现像;(c)图 3(b)中虚线位置的归一化强度;(d)局部归一化强度

Fig. 3 Experimental results of OSH system using LG beam-axis cone lens pupil. (a) Transmittance distribution of LG beam-axis cone pupil ($\epsilon = 0.5$); (b) reconstruction image of complex hologram; (c) normalized intensity of the position of the dotted line in Fig. 3 (b); (d) local normalized intensity

从图 3(b)~图 3(d)可以看出,相较于采用环形光瞳的结果,用该方法提取的边缘信息较为清晰,几乎没有噪声干扰,无须再经过数字图像滤波处理,不仅利于实时观察与记录,且避免了滤除噪声时对细节信息的破坏。为了进一步评价边缘提取的质量,本文使用均方误差 M_{SE} 和峰值信噪比 P_{SNR} 进行评价。

$$M_{SE} = \frac{1}{mn} \sum_{x_0=0}^{m-1} \sum_{y_0=0}^{n-1} [P(x_0, y_0) - K(x_0, y_0)]^2, \quad (18)$$

$$P_{SNR} = 10 \cdot \lg \left(\frac{V_{MAX}^2}{M_{SE}} \right), \quad (19)$$

式中: m 和 n 表示单色图片 $P(x_0, y_0)$ 和 $K(x_0, y_0)$ 的分辨率,为 $m \times n$; V_{MAX} 表示图像点颜色的最大值。

使用 M_{SE} 和 P_{SNR} 对边缘提取质量进行评价,比较实验重建后的图片与原始图片。首先使用边缘检测算子对带有字母的图片“O”进行处理,获取其字母的边缘信息作为原始图片。考虑到噪声带来的影响,采用 Canny 边缘检测算子对图片进行边缘提

取^[31-32],得到的结果作为原始图片,分别与使用环形光瞳和 LG 光束-轴锥镜光瞳时的实验结果进行对比,对比结果见表 1。

表 1 相同孔径比($\epsilon = 0.5$)下使用环形光瞳和 LG 光束-轴锥镜光瞳时边缘提取后图像质量对比

Table 1 Comparison of image quality after edge extraction using ring pupil and LG beam-axis cone lens pupil at the same aperture ratio ($\epsilon = 0.5$)

Pupil	M_{SE}	P_{SNR}/dB
Annular	1994.10	15.24
LG beam-axis cone lens	633.86	20.11

表 1 给出了在 $\epsilon = 0.5$ 的情况下,两种光瞳的边缘提取质量,可以看出与使用环形光瞳相比,使用 LG 光束-轴锥镜光瞳时 M_{SE} 明显下降, P_{SNR} 得到了提高,由此证明采用 LG 光束-轴锥镜光瞳时的边缘提取质量优于采用环形光瞳时的结果,同时也验证了图 2 与图 3 的对比结果。

本文对不同孔径比的局域空心光束进行了比较,以选出边缘提取效果最佳的孔径大小。不同孔

径比的再现像如图 4(a)~(d), 对应虚线位置处的

光强归一化强度如图 4(e)~(h)所示。

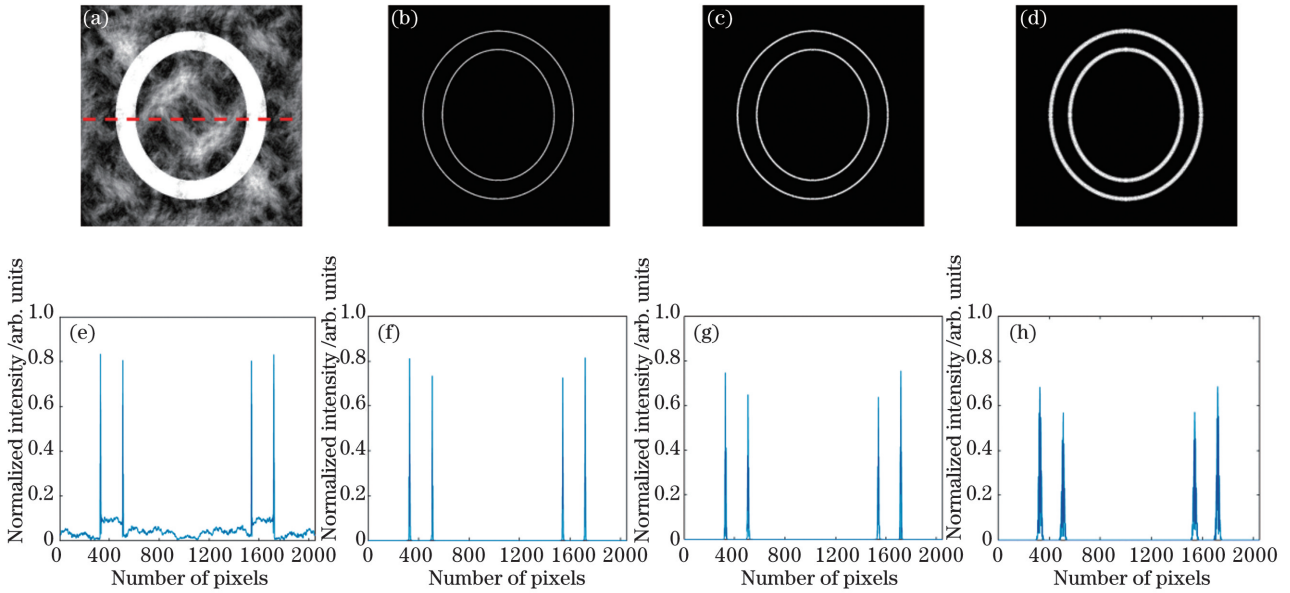


图 4 不同孔径比时,使用 LG 光束-轴锥镜光瞳时的复全息图再现像及归一化强度。(a)(e) $\epsilon=0.3$; (b)(f) $\epsilon=0.5$; (c)(g) $\epsilon=0.7$; (d)(h) $\epsilon=0.9$

Fig. 4 Reconstructed images and normalized intensity using LG beam-axis cone lens pupil with different aperture ratios.

(a)(e) $\epsilon=0.3$; (b)(f) $\epsilon=0.5$; (c)(g) $\epsilon=0.7$; (d)(h) $\epsilon=0.9$

从图 4 可以看出:当 $\epsilon=0.3$ 时,边缘提取的效果并不明显,这是由于需要满足此孔径比时, LG 光束-轴锥镜所构成的光束中心光强不为零,导致低频成分未被滤除,高频成分也不明显;而选择 ϵ 为 0.7 和 0.9 时,归一化的旁瓣强度逐渐增大,主瓣强度逐渐减弱,边缘增强不理想,可以通过恢复已衰减的低空间频率来补偿重建过程中的边缘增强,即减小孔径比,如将孔径比降至 0.5,可以看出孔径比为 0.5 时边缘提取的效果得到增强。结合表 2 进行分析,给出了不同孔径比下 LG 光束-轴锥镜光瞳边缘提取质量对比,当 $\epsilon=0.5$ 时,峰值信噪比最高,边缘提取质量明显优于其他孔径比。通过对图 4 与表 2 的结果进行分析,选用 $\epsilon=0.5$ 的情况效果最为理想,后续将继续采用此孔径比

进行实验。

表 2 不同孔径比下使用 LG 光束-轴锥镜光瞳时边缘提取质量对比

Table 2 Comparison of image quality after edge extraction using LG beam-axis cone lens at different aperture ratios

Aperture ratio	M_{SE}	P_{SNR}/dB
0.3	18392.16	5.48
0.5	633.86	20.11
0.7	1204.43	17.32
0.9	3063.29	13.27

接着将图 5(a) 所示(分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$)的复杂物体放置于距离透镜 L_1 后焦面 75 mm 处的二维扫描载物台上进行实验。图 5(b)

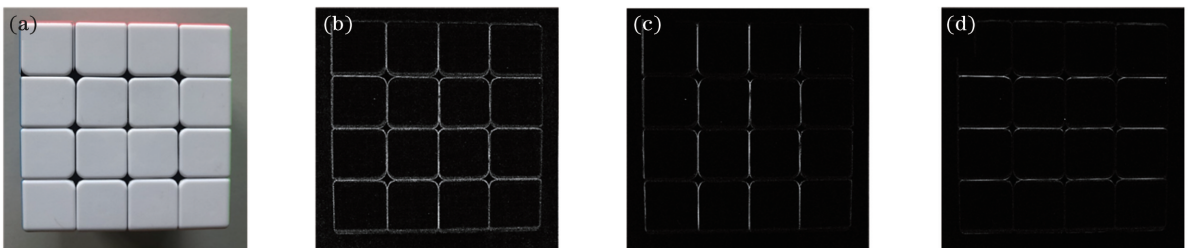


图 5 对复杂物体的实验结果($\epsilon=0.5$)。(a)原始物体;(b)复全息图再现像;(c)纵轴方向再现像;(d)横轴方向再现像
Fig. 5 Experimental results for a complex object ($\epsilon=0.5$). (a) Original object; (b) reconstruction image of complex hologram; (c) reconstruction image in the vertical direction; (d) reconstruction image in the horizontal direction

为复杂物体的复全息图的再现像,可以看出物体的边缘信息被完整且清晰地提取出来。研究中为了提取特定的边缘区域,可以通过移动 LG 光束-轴锥镜光瞳改变其对称性,使用两个相同参数的 LG 光束-轴锥镜光瞳来实现,所提取信息的方向与移动方向相垂直。图 5(c) 给出纵轴方向上的边缘提取再现像,图 5(d) 给出横轴方向上的边缘提取再现像。基于实验进一步改变两个光瞳之间的夹角,还能获得

不同方向上的边缘信息。

3.2.2 使用幂函数分布的振幅型光瞳

本文提出的第二种光瞳为幂函数分布的振幅型光瞳,依然选用分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 的带有字母“O”的透光片,对 n_0 取 1、2 和 3 时的实验结果进行比较,选出边缘提取效果最佳的幂次,不同幂次的再现像如图 6(b)~(d),图 6(e)~(g) 分别对应虚线位置的光强归一化强度。

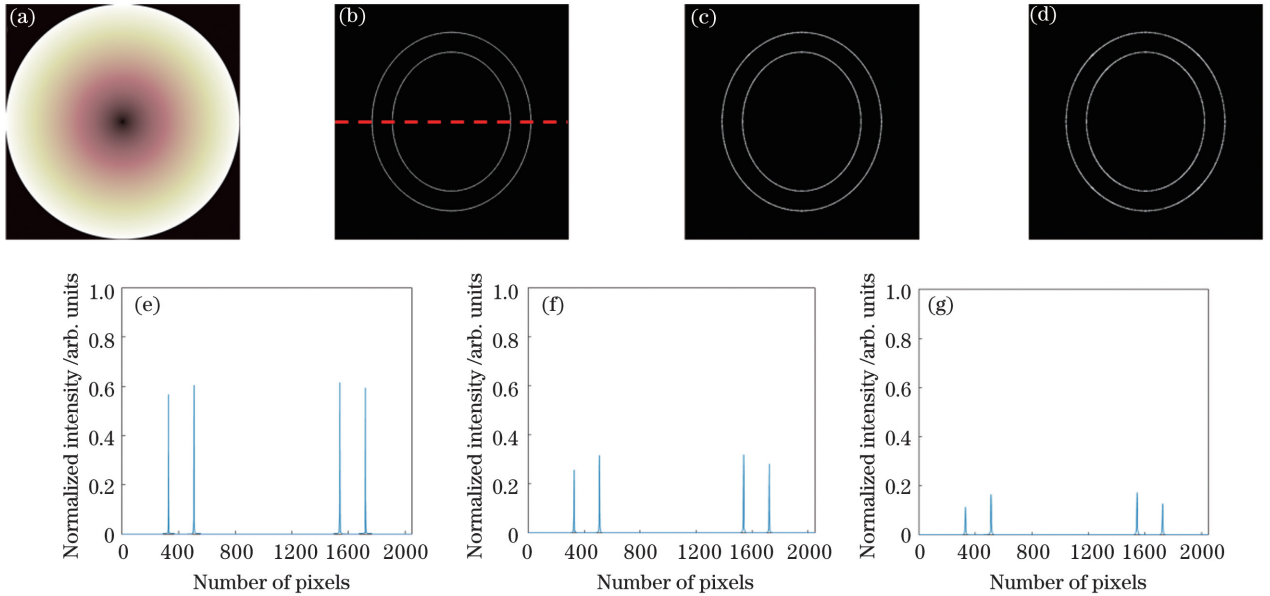


图 6 不同幂次下,使用幂函数分布的振幅型光瞳时的复全息图再现像及归一化强度。(a)幂函数分布的振幅型光瞳($n_0=1$)的透过率分布;(b)(e) $n_0=1$;(c)(f) $n_0=2$;(d)(g) $n_0=3$

Fig. 6 Reconstructed images and normalized intensity of a complex hologram using amplitude-type pupils with power function distribution under different powers. (a) Transmittance distribution of amplitude type pupil with power function distribution ($n_0=1$); (b)(e) $n_0=1$; (c)(f) $n_0=2$; (d)(g) $n_0=3$

通过图 6(b)~(g)可以看出,三种幂次所引入的噪声均可忽略不计,所提取的边缘信息都较为清晰,但当 $n_0=1$ 时,提取的边缘信息归一化强度最大,同时为了保证严谨性,对幂次为 1~6 时的 M_{SE} 和 P_{SNR} 进行比较,具体数值如表 3 所示,同样可以

看出当 $n_0=1$ 时, P_{SNR} 值最大,随着幂次的逐渐增加, P_{SNR} 逐步减小,这是因为光强伴随幂次的增加而减弱,所以各幂次间 P_{SNR} 的差值越来越小,更大幂次的提取效果应该不会更优,故只考虑到 $n_0=6$ 。为方便观察并保证清晰度,之后继续使用 $n_0=1$ 进行实验。

表 3 不同幂次下使用幂函数分布的振幅型光瞳时边缘提取图像质量对比

3.2.3 两种改进方案的结果对比

Table 3 Comparison of image quality after edge extraction using amplitude type pupil with different power distributions

Power	M_{SE}	P_{SNR}/dB
1	135.79	26.80
2	255.67	24.05
3	262.08	23.95
4	280.30	23.65
5	290.72	23.50
6	296.01	23.42

针对本文所提出的两种光瞳的边缘提取质量进行一组对比实验,选择分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 的矩形图案进行实验,如图 7(a) 所示,图 7(b)~(d) 为 LG 光束-轴锥镜光瞳($\epsilon=0.5$)的复全息图再现像及虚线位置处的光强归一化强度,图 7(e)~(g) 为幂函数分布的振幅型光瞳($n_0=1$)的复全息图再现像及虚线位置处的光强归一化强度。

通过对图 7(d)和图 7(g)进行比较,使用 LG 光

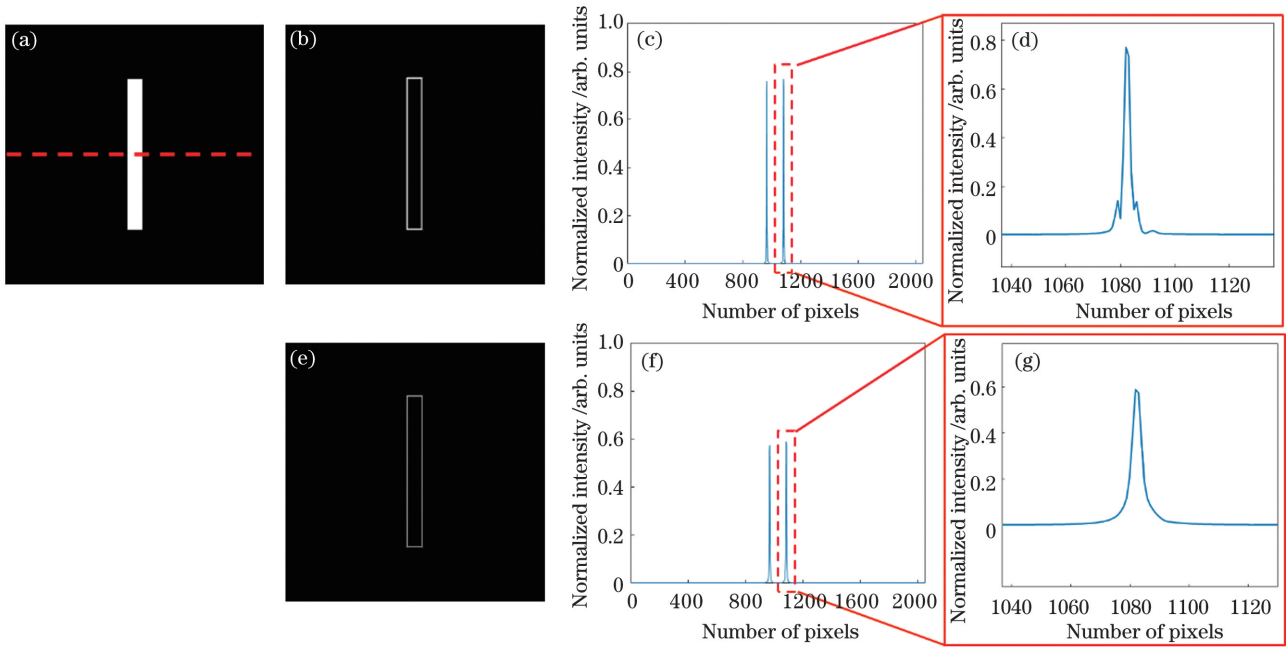


图 7 两种光瞳对于矩形物体的复全息图再现像及归一化强度。(a)原始物体;(b)(c)(d)LG 光束-轴锥镜光瞳($\epsilon=0.5$); (e)(f)(g)幂函数分布的振幅型光瞳($n_0=1$)

Fig. 7 Reconstructed images and normalized intensity using two kinds of pupils for the rectangular object. (a) Original object; (b)(c)(d) LG beam-axis cone lens pupil ($\epsilon=0.5$); (e)(f)(g) amplitude type pupil with power function distribution ($n_0=1$)

束-轴锥镜光瞳提取边缘信息时,仍有旁瓣存在,虽会对提取的精度产生一定的影响,但其光强归一化强度大,利于观察实验结果;而使用幂函数分布的振幅型光瞳提取边缘信息时,虽然光强归一化强度相对较小,但没有旁瓣的干扰,提取方式更接近一阶导数边缘检测算子的单线提取,不会引入噪声,结合表 4 也可以看出,使用幂函数分布的振幅型光瞳的峰值信噪比相对较高。故实验可根据不同需求,选择更为合适的光瞳进行边缘信息的提取。

表 4 使用 LG 光束-轴锥镜光瞳($\epsilon=0.5$)和幂函数分布的振幅型光瞳($n_0=1$)时边缘提取图像质量对比

Table 4 Comparison of image quality after edge extraction using LG beam-axis cone lens pupil ($\epsilon=0.5$) and power function distribution amplitude type pupil ($n_0=1$)

Pupil	M_{SE}	P_{SNR}/dB
LG beam-axis cone	125.75	27.14
Amplitude type	21.27	34.85

4 结 论

提出了两种光瞳在 OSH 系统中实现高频信息实时提取的方法。两种光瞳均无须进行数字图像滤

波处理,简化了实验步骤,同时避免了滤波对细节信息的破坏。其中,相较于环形光瞳,使用 LG 光束-轴锥镜光瞳时,具有较高的抗噪声能力、成像质量和光强强度,利于观察提取信息,且能实现特定方向的边缘提取;而使用幂函数分布的振幅型光瞳,其更接近一阶导数边缘检测算子单线提取的方式,不仅不会引入噪声,保证了高提取精度,而且能带来更高的峰值信噪比。两种光瞳可分别适用于不同的实验要求。

参 考 文 献

- [1] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. Applied Physics Letters, 1967, 11(3): 77-79.
- [2] Schnars U, Jüptner W P O. Digital recording and numerical reconstruction of holograms[J]. Measurement Science & Technology, 2002, 13(9): R85-R101.
- [3] Ren Z B, Lin Y M. Progress in optical scanning holography[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111009.

任振波, 林彦民. 光学扫描全息术研究进展[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111009.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Indebetouw G, Zhong W. Scanning holographic microscopy of three-dimensional fluorescent specimens [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(7): 1699-1707.
- [7] Poon T C. Real-time preprocessing of holographic information[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(11): 3174-3180.
- [8] 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.
- [9] Qin X Y, Su D, Jia X Y, et al. Dislocation correction algorithm for adaptive laser confocal high-speed scanning microscopic imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0118001.
秦小云, 苏丹, 贾新月, 等. 自适应激光共焦高速扫描显微成像错位校正算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0118001.
- [10] 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.
- [11] Zong Y H, Zhou C H, Ma J Y, et al. Three-dimensional edge extraction in optical scanning holography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10022: 1002208.
- [12] Ren Y X, Wu J G, Zhou X W, et al. Experimental generation of Laguerre-Gaussian beam using angular diffraction of binary phase plate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(6): 3930-3935.
任煜轩, 吴建光, 周小为, 等. 相位片角向衍射产生拉盖尔-高斯光束的实验研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(6): 3930-3935.
- [13] Shi L, Li J, Tao T. Micro-particles' rotation by Laguerre-Gaussian beams produced by computer-generated holograms[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(11): 1226-1229.
施丽, 李静, 陶陶. 利用计算全息产生的拉盖尔-高斯光束旋转微粒[J]. *激光与红外*, 2012, 42(11): 1226-1229.
- [14] Wang H C, Hu A, Chen P F. Generation of Laguerre-Gaussian beam based on spatial light modulator[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(3): 447-450.
汪慧超, 胡阿健, 陈培锋. 空间光调制器产生拉盖尔-高斯光束方法研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(3): 447-450.
- [15] Cheng Z M, Wu F T, Fan D D, et al. Non-diffraction Bessel-like beam generated by green LED source[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2012, 42(8): 805-811.
程治明, 吴逢铁, 范丹丹, 等. 绿光LED产生无衍射Bessel光束[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42(8): 805-811.
- [16] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4: 651-654.
- [17] Cheng Z M, Wu F T, Fang X, et al. Theory and experiment of generating multi-bottle beam with higher light-intensity gradient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1114001.
程治明, 吴逢铁, 方翔, 等. 产生多个高光强梯度局域空心光束的理论实验[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1114001.
- [18] Zhang Q A, Wu F T, Zheng W T. Eliminating the center spot of bottle beam generated by axicon-lens system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(3): 034205.
张前安, 吴逢铁, 郑维涛. 轴棱锥-透镜系统产生局域空心光束中心亮斑的消除[J]. *物理学报*, 2012, 61(3): 034205.
- [19] Zhang Y. Generation of thin and hollow beams by the axicon with a large open angle[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(4): 508-514.
- [20] Goodman J W, Cox M E. *Introduction to Fourier optics*[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [21] Wang X, Li Z L, Nan N, et al. A method to improve sensitivity of swept source optical coherence tomography system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0807002.
王瑄, 李中梁, 南楠, 等. 一种提高扫频光学相干层析成像系统灵敏度的方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0807002.
- [22] Zhi S T, Zhang H J, Zhang D X. Super-resolution optical microscopic imaging method based on annular illumination with high numerical aperture [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(2): 301-306.
支绍韬, 章海军, 张冬仙. 基于大数值孔径环形光锥

- 照明的超分辨光学显微成像方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(2): 301-306.
- [23] Zhi S T, Zhang H J, Zhang D X. Microscopic imaging method and system based on annular aperture and dark-field illumination [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 12-15.
支绍韬, 章海军, 张冬仙. 基于环形孔径和暗视场照明的显微成像方法与系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 12-15.
- [24] Zhang Q G, Li C G, Lou Y L, et al. Amplitude optical pupil filters with power function distribution [J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 743-748.
张巧鸽, 李重光, 楼宇丽, 等. 幂函数分布的振幅型光瞳滤波器[J]. 激光技术, 2017, 41(5): 743-748.
- [25] Poon T C, Kim T. Optical image recognition of three-dimensional objects[J]. Applied Optics, 1999, 38(2): 370-381.
- [26] Arlt J, Dholakia K. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon[J]. Optics Communications, 2000, 177(1/2/3/4/5/6): 297-301.
- [27] Wu F T, Lu W H, Ma B T. The beam propagation and transformation in axicon-lens system [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2557-2560.
吴逢铁, 卢文和, 马宝田. 轴棱锥: 透镜系统的光束传输与变换[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2557-2560.
- [28] Wang R D, Zhang Y P, Wang F, et al. Edge extraction based on optical scanning holography system with annular pupils [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0109001.
王仁德, 张亚萍, 王帆, 等. 基于环形光瞳的光学扫描全息系统实现边缘提取[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0109001.
- [29] Poon T C. Optical scanning holography with MATLAB[M]. Boston: Springer, 2007.
- [30] Kotlyar V V, Almazov A A, Khonina S N, et al. Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(5): 849-861.
- [31] Han L L, Tian Y M, Qi Q H, et al. Research on digital image edge detection algorithms based on MATLAB [J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2019, 27(7): 98-101.
韩利利, 田益民, 齐千慧, 等. 基于 MATLAB 数字图像边缘检测算法的研究 [J]. 北京印刷学院学报, 2019, 27(7): 98-101.
- [32] Yuan Q Q, Zhang G, Chen X J, et al. Regularization of point cloud features by fusing improved canny algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(16): 162801.
袁俏俏, 章光, 陈西江, 等. 融合改进 Canny 算法的点云特征正则化 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(16): 162801.