

# 基于环形光瞳的光学扫描全息系统实现边缘提取

王仁德, 张亚萍\*, 王帆, 祝旭锋, 李重光, 张永安, 许蔚

昆明理工大学激光信息处理技术与应用重点实验室, 云南 昆明 650500

**摘要** 提出一种在光学扫描全息系统中采用环形光瞳滤波器来实现选择性边缘提取的方法, 基于双光瞳外差扫描技术使用单个二维光学扫描来获取三维物体的全息信息。首先, 采用小孔滤波器和环形光瞳滤波器作为两个光瞳来形成复合光场对物体进行扫描, 以提取物体的边缘信息; 其次, 通过移动并破坏环形光瞳滤波器的对称性, 并选择两个完全相同的环形光瞳滤波器来实现对物体各向异性的选择性提取。计算机仿真实验的结果表明, 通过在光学扫描全息系统中使用环形光瞳滤波器, 可以很好地实现各向同性与各向异性的选择性边缘提取。

**关键词** 全息; 数字全息; 光学扫描全息; 边缘提取; 环形光瞳滤波器

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0109001

## Edge Extraction Based on Optical Scanning Holography System with Annular Pupils

Wang Rende, Zhang Yaping\*, Wang Fan, Zhu Xufeng, Li Chongguang,  
Zhang Yong'an, Xu Wei

Key Lab of Laser Information Processing Technology and Application, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract** A method for selective edge extraction in an optical scanning holography system is proposed based on annular pupil filters, in which a single two-dimensional optical scan is used to acquire the holographic information of a three-dimensional object based on the two-pupil heterodyne scanning technique. First, a small aperture filter and an annular pupil filter are used as two pupils to form a composite light field for scanning an object and extracting the edge information of an object. Then, the selective extraction of the anisotropy of an object is achieved by moving and destroying the symmetry of an annular pupil filter and simultaneously selecting two identical annular pupil filters. The computer simulation results show that the selective edge extraction of isotropy and anisotropy can be well achieved by using annular pupil filters in an optical scanning holography system.

**Key words** holography; digital holography; optical scanning holography; edge extraction; annular pupil filter

**OCIS codes** 090.1995; 100.2980; 110.2650

## 1 引 言

图像是人们获取物体信息的重要来源,也是扩展人类视觉的重要手段。图像边缘是指图像中灰度发生急剧变化的区域,它携带有图像的大部分细节信息,一直都是图像分析的热点<sup>[1-3]</sup>。近年来,图像边缘提取的方法受到越来越多的关注,它被广泛应用于图像处理和分析技术中,如特征描述<sup>[4]</sup>、图像识别<sup>[5]</sup>、图像分割<sup>[6]</sup>、图像增强和图像压缩<sup>[7-8]</sup>等。目

前,许多学者采用不同的边缘检测算子来提取图像边缘<sup>[9]</sup>,但边缘检测算子的局限性较大,需要根据不同类型的图像信息进行大量实验来建立阈值<sup>[10-11]</sup>,过程繁琐,容易出错,因此该方法不适用于数字全息技术的实时检测和成像。

光学扫描全息术(OSH)是一种特殊的非相干实时数字全息技术<sup>[12-13]</sup>,它使用单个二维光学扫描来获得三维物体的全息信息,同时在记录过程中保留相位信息。在 OSH 系统中采用了双光瞳外差非

收稿日期: 2018-07-23; 修回日期: 2018-08-16; 录用日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61565010,11762009)、云南省自然科学基金(2018FB101)

\* E-mail: yapingzhang11@qq.com

相干图像技术<sup>[14-15]</sup>, 所获得的外差扫描信号携带了物体的全息信息。外差信号可以使用电子滤波提取并由电路解调以获得所需的全息图<sup>[16]</sup>。其中, 两个光瞳功能的选择对 OSH 系统功能的实现很重要。在以往的研究中, 提出一种时变涡旋光束(TV-VB)来实现边缘检测。TV-VB 通过使用螺旋相位板<sup>[17-19]</sup>作为一个光瞳来实现边缘提取, 但这种方法的噪声与光强衰减相同, 会影响提取效果; 在提取各向异性边缘时, 仅可以实现特定间隔的图像边缘提取, 不能提取指定方向的图像<sup>[20-21]</sup>。

本文介绍了一种在 OSH 系统中使用环形光瞳滤波器来实现选择性边缘提取的方法, 可以实现各向同性和各向异性边缘的选择性提取。通过傅里叶光学中的角谱衍射理论可知, 从衍射屏到空域中的观察屏的光波传播相当于光在频域中通过有限半径的低通滤波器<sup>[22-23]</sup>。当一束光通过光学透镜时, 透镜的中间部分是低频区域, 边缘部分是高频区域, 这一小部分高频区域却包含了物体的边缘信息。可以通过环形光瞳滤波器实现波前调制, 然后提取高频信息, 进而实现边缘的提取。近年来, 环形光瞳滤波器已广泛应用于光学显微镜领域, 可大大提高所提取图像的分辨率。用于共聚焦显微镜的环形光瞳可以改善三维轮廓测量的横向分辨率<sup>[24]</sup>; 环形光瞳滤波器在显微超分辨测量中具有更好的超分辨效果<sup>[25]</sup>; 环形光瞳滤波器结合径向偏振照明可以改善显微镜光学系统的检测性能<sup>[26-27]</sup>。Poon<sup>[28]</sup>使用高斯环在 OSH 系统中实现边缘的提取, 但是该方法只能实现各向同性边缘的提取, 并且提取效果较差。本研究中采用环形光瞳滤波器作为光瞳函数来实现边缘提取, 环形光瞳滤波器可以对波前进行调制以

实现光斑的压缩, 从而抑制低频成分, 使光电探测器可采集到更多可用于成像的高频信息。然而, 在某些情况下, 围绕某些方向和边缘的特征信息更受关注, 因此需要各向异性边缘提取方法来采集这些边缘信息<sup>[29-31]</sup>。本文通过移动和破坏环形光瞳滤波器的对称性并同时使用两个相同的环形光瞳滤波器来实现各向异性边缘提取。通过计算机仿真实验验证在 OSH 系统中使用环形光瞳滤波器的各向同性和各向异性边缘选择性提取的效果。

## 2 OSH 系统的基本原理

OSH 系统的原理如图 1 所示。在 OSH 系统中, 两个分光镜(BS<sub>1</sub>、BS<sub>2</sub>)和两个反射镜(M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>)一起形成 Mach-Zehnder 干涉仪<sup>[32]</sup>。激光器发射的光束中心频率为  $\omega_0$ , 经 BS<sub>1</sub> 分成两部分。Mach-Zehnder 干涉仪的一个信号通过调制频率为  $\Omega$  的声光调制器(AOM), 将该信号的频率上升至  $\omega_0 + \Omega$ , 这种方式可以形成外差扫描系统。两个信号分别通过两个光瞳, 图 1 所示的两个光瞳分别位于两个具有相同焦距的透镜(L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>)的前焦点; 然后, 这两个信号由 BS<sub>2</sub> 合为一束光扫描位于二维扫描载物台(x-y scanner platform)上与 L<sub>2</sub> 的后焦点的距离为  $z$  处的待测物体。L<sub>3</sub> 用于将所有透射光收集到光电探测器(PD), PD 用于收集光学信号并将其转换为携带有物体相位信息的电信号  $i(x, y)$ , 此时  $i(x, y)$  由基带电流和外差电流组成。

通过具有外差频率为  $\Omega$  的带通滤波器(BPF)提取外差电流  $i_\Omega$ , 以去除基带电流。外差电流  $i_\Omega$  通过锁相放大器(lock-in amplifier)进行信号解调, 锁相放大器包括乘法器和低通滤波器两部分, 外差信

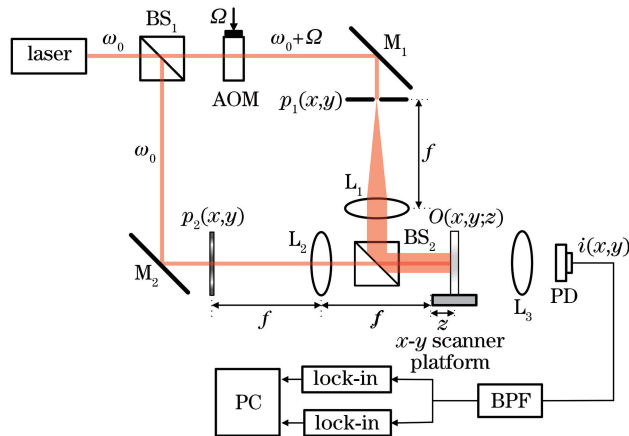


图 1 OSH 系统原理图

Fig. 1 Schematic of OSH system

号分为两路,分别与相互正交的两路单频信号  $\cos(\Omega t)$  和  $\sin(\Omega t)$  混频,通过低通滤波器提取出同相分量  $i_c(x, y)$  和正交分量  $i_s(x, y)$ :

$$i_c(x, y) = \text{Re} \left\{ \int \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [ |O(x, y; z)|^2 ] \cdot O_{\text{TF}} \} dz \right\}, \quad (1)$$

$$i_s(x, y) = \text{Im} \left\{ \int \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [ |O(x, y; z)|^2 ] \cdot O_{\text{TF}} \} dz \right\}, \quad (2)$$

式中:  $O(x, y; z)$  为待测三维物体的透射率函数,其相位信息可通过二维扫描获得;  $\text{Re}$  和  $\text{Im}$  分别函数的实部和虚部;  $\mathcal{F}$  和  $\mathcal{F}^{-1}$  分别为傅里叶变换和傅里叶逆变换;  $O_{\text{TF}}$  是 OSH 系统的光学传递函数。

$$O_{\text{TF}}(k_x, k_y; z) = \exp \left[ j \frac{z}{2k_0} (k_x^2 + k_y^2) \right] \times \iint p_1^*(x', y') p_2 \left( x' + \frac{f}{k_0} k_x, y' + \frac{f}{k_0} k_y \right) \times \exp \left[ j \frac{z}{f} (x' k_x + y' k_y) \right] dx' dy', \quad (3)$$

式中:  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为光波的波长;  $z$  为待测物体与  $L_2$  后焦面的距离;  $f$  为透镜  $L_1$  和  $L_2$  的焦距;  $k_x$  和  $k_y$  分别为频域坐标;  $x'$  和  $y'$  分别为横向和纵向的积分变量;  $p_1$ 、 $p_2$  分别为两个光瞳函数。

本研究中,光瞳函数  $p_1(x, y)$  采用小孔滤波器,即  $\delta(x, y)$ ; 另一个光瞳函数  $p_2(x, y)$  采用环形光瞳滤波器。因此该 OSH 系统的两个光瞳函数可以分别表示为

$$p_1(x, y) = \delta(x, y), \quad (4)$$

$$p_2(x, y) = t(r, \omega) = g \left( \frac{r}{\omega_0} \right) - g \left( \frac{r}{\omega_i} \right), \quad (5)$$

式中:  $t(r, \omega)$  为在极坐标中环形光瞳滤波器的传输函数;  $g(\cdot)$  为圆孔的透射率函数;  $\omega_0$  和  $\omega_i$  分别为环形光瞳滤波器的外径和内径;  $r$  为极坐标,

$$r = (x^2 + y^2)^{-1}.$$

由(1)式和(2)式可得到双光瞳外差扫描系统中待测物体的两个处理结果,即余弦全息图(同相)和正弦全息图(正交)。所得到的两个全息图储存在计算机中,通过计算机合成与带有物体信息的复分布全息图,可以解决全息记录中的双图像问题并实现边缘信息的提取,复分布全息图的复数形式为

$$H_c(x, y) = i_c(x, y) + j i_s(x, y) = \int \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [ |O(x, y; z)|^2 ] \cdot O_{\text{TF}} \} dz. \quad (6)$$

结合(3)~(5)式,(6)式可以表示为

$$H_c(x, y) = \int \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [ |O(x, y; z)|^2 ] \exp \left[ -j \frac{z}{2k_0} (k_x^2 + k_y^2) \right] \times p_2 \left( -\frac{f}{k_0} k_x, -\frac{f}{k_0} k_y \right) \right\} dz. \quad (7)$$

由(7)式可以看出,通过与空间脉冲响应进行卷积,可以重建物体的全息图,其中空间脉冲响应是  $O_{\text{TF}}$  的傅里叶逆变换。

### 3 仿真实验和分析

为了更好地验证本文方法的有效性和可行性,将传统 OSH 系统的仿真结果与本文方法的结果进行比较。传统的 OSH 系统一般采用两个光瞳函数分别产生点光源和平面波,即  $p_1 = \delta(x, y)$ ,  $p_2 = 1$ 。仿真实验中模拟的物体是分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  的含有字母“O”的透明板,激光器的输出波长为  $632.8 \text{ nm}$ ,物体与透镜  $L_2$  后焦平面的距离为  $100 \text{ mm}$ 。图 2 所示为传统 OSH 系统的重建结果。可以看到,传统的 OSH 系统可均匀地提取物体的全部信息,但边缘信息不明显。

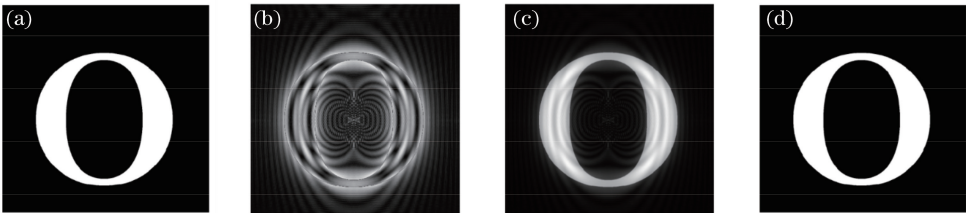


图 2 传统 OSH 系统的重建结果。(a)原始物体;(b)余弦全息图;(c)正弦全息图;(d)复分布全息图

Fig. 2 Reconstruction results of traditional OSH system. (a) Original object; (b) cosine-hologram;

(c) sine-hologram; (d) complex hologram

将环形光瞳滤波器作为一个光瞳的 OSH 系统,令一个光瞳仍产生点光源,如(4)式和(5)式所示。在环形光瞳滤波器中,孔径比  $\epsilon$  是一个重要的

性能指标,是指环形光瞳滤波器的内半径( $\omega_i$ )和外半径( $\omega_0$ )的比值,可以表示为  $\epsilon = \omega_i/\omega_0$ 。仿真中外半径为  $10 \text{ mm}$ ,即  $\omega_0 = 10 \text{ mm}$ ,孔径比为  $0.5$ ,即

$\epsilon=0.5$  的环形光瞳滤波器。模拟物体仍然是分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  的含有字母“O”的透明板。使用环形光瞳滤波器的 OSH 系统重建结果如图 3 所示。其中,图 3(a)所示为  $\epsilon=0.5$  的环形光瞳

滤波器的透射率分布,白色部分是透光部分,即幅度透射率为 1,中间黑色部分是不透光部分,即幅度透射率为 0,图 3(b)~(d)分别为重建的余弦全息图、正弦全息图和复分布全息图。

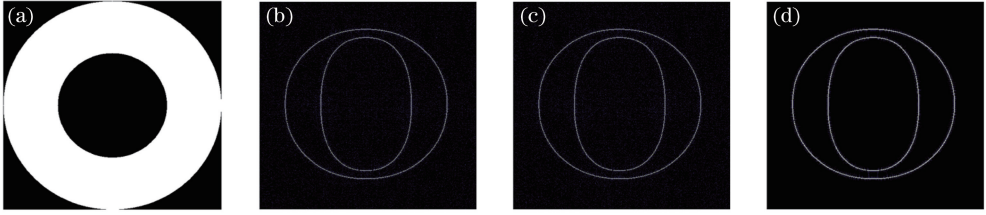


图 3 使用环形光瞳滤波器的 OSH 系统重建结果。(a)环形光瞳滤波器( $\epsilon=0.5$ )的透射率分布;(b)余弦全息图;(c)正弦全息图;(d)复分布全息图

Fig. 3 Reconstruction results of OSH system with annular pupil filter. (a) Transmission distribution of annular pupil filter with  $\epsilon=0.5$ ; (b) cosine-hologram; (c) sine-hologram; (d) complex hologram

由图 3 可知,重建后全息图的高频部分的透射率明显增加。通过与传统的 OSH 系统进行比较,发现将环形光瞳滤波器作为 OSH 系统中的一个光瞳,可实现对物体各向同性边缘的提取。本研究还通过实验比较不同孔径比的边缘提取的效果。选择 4 种不同的孔径比( $\epsilon=0.1, 0.4, 0.6$  和  $0.9$ ),并与传统 OSH 系统进行比较,本实验采用的原始图像如

图 2(a)所示,其仍然是分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  的含有字母“O”的透明板,结果如图 4 所示。使用传统 OSH 系统重建的全息图如图 4(a)所示;图 4(b)~(e)分别为使用  $\epsilon=0.1, 0.4, 0.6$  和  $0.9$  的环形光瞳滤波器的重建结果;图 4(f)~(j)分别为重建图像上与图 4(a)红色虚线相同位置的归一化强度。

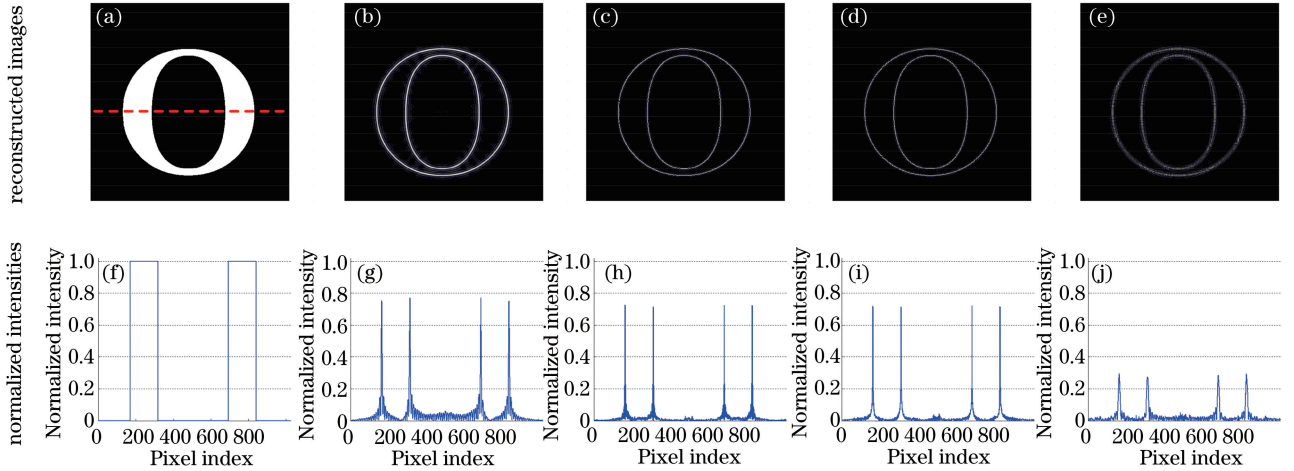


图 4 不同孔径比时,环形光瞳滤波器的 OSH 系统重建结果及归一化强度。(a)(f)传统的 OSH 系统;(b)(g)  $\epsilon=0.1$ ;(c)(h)  $\epsilon=0.4$ ;(d)(i)  $\epsilon=0.6$ ;(e)(j)  $\epsilon=0.9$

Fig. 4 Reconstruction results and normalized intensities of OSH system with annular pupil filters for different hole-diameter ratios. (a)(f) Traditional OSH system; (b)(g)  $\epsilon=0.1$ ; (c)(h)  $\epsilon=0.4$ ; (d)(i)  $\epsilon=0.6$ ; (e)(j)  $\epsilon=0.9$

从图 4 可以看出, $\epsilon=0.4$  和  $\epsilon=0.6$  的边缘提取效果比  $\epsilon=0.1$  和  $\epsilon=0.9$  更理想,信噪比更高。这主要是因为孔径比过大时,光的透射率显著降低,重建图像整体变暗,信噪比降低;而孔径过小时,光的滤波不完全,部分低频成分没有被滤除,从而影响成像的效果。可以发现孔径比为  $0.5$  左右时,所提取的效果较好,所以在接下来的实验

中,将用  $\epsilon=0.5$  的环形光瞳滤波器进行实验。尝试采用所提出的基于环形光瞳滤波器的 OSH 系统对较复杂物体进行各向同性边缘提取的仿真实验。实验的原始物体如图 5(a)所示,其分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。系统中将孔径比为  $0.5$  的环形光瞳滤波器作为一个光瞳,另一个光瞳采用点光源,物体位于与透镜  $L_2$  后焦平面的距离为

100 mm 的二维扫描载物台上。通过计算机将扫描后得到的全息图与空间脉冲响应进行卷积,便可以重建出物体的复分布全息图[图 5(b)]。可以



图 5 复杂物体的实验结果。(a)原始物体;(b)复分布全息图

Fig. 5 Experimental results of complex object. (a) Original object; (b) complex hologram

在图像分割等领域,人们往往对物体的某些具有独特性质的特定边缘区域更感兴趣。为了识别和分析目标物体,有必要将这些特定边缘的区域进行分离提取,以方便进一步的测量和分析。对于这些情况,各向同性边缘提取方法已经无法取得预期的效果,因此本研究将探索针对某些特定边缘的各向异性边缘的提取方法。

通过移动和破坏环形光瞳滤波器的对称性,并同时使用两个相同的环形光瞳滤波器来实现对物体各向异性的选择性边缘提取。破坏环形光瞳滤波器的对称性是通过将环形光瞳滤波器的中心点从光瞳平面原点转移到极坐标的指定位置,其中光瞳平面的极坐标建立方式如图 6(a)所示。在确定了一个环形光瞳滤波器的位置后,改变另一个环形光瞳滤波器的位置,使两个环形光瞳滤波器与极坐标中心连线的夹角呈不同的角度,并随着移动方向的角度改变,选择性地从不同方向提取边缘信息。仿真中采用的两个环形光瞳滤波器的参数均为  $\omega_0 = 10 \text{ mm}$ 、 $\epsilon = 0.5$ 。当一个光瞳移动距离为 5 mm、偏转角为 0 时,另一个光瞳采用相同的移动距离,并且与第一个光瞳的夹角分别为  $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$  和  $\pi$ ,结果如图 6 所示。由于计算机仿真重建期间发生信号混叠,图像具有某些缺陷,因此在数字重建时,通过加入自适应阈值法处理输出结果,去除系统的部分噪声。自适应阈值法主要是根据图像的像素邻域计算阈值,将每个像素的值与邻域像素的平均值进行比较。如果某像素的值与其局部平均值差别很大,就会被当作有效值在阈值化过程中被提取出来,并设为 1,而其他像素则设为 0,从而辅助增强物体的成像效果。

看出,系统实现了对原始物体各向同性边缘的提取,并且可以提取到一些细节信息,如窗户的反光边缘就被所提系统检测并提取到。

从仿真结果可以发现,采用双环形光瞳滤波器的 OSH 系统可以实现各向异性的边缘提取。应当注意的是,各向异性边缘提取的信息在垂直于滤波器运动的方向上更强,而在沿着运动的方向上的信息被滤除。从图 6 可以看出,各向异性边缘提取的结果取决于两个环形光瞳滤波器夹角的大小。随着夹角大小和移动方向的改变,可选择性地提取来自不同方向的边缘信息。当两个滤波器的夹角在 0 到  $\pi/2$  之间变化时,边缘提取的方式是单线提取,而在  $\pi/2$  到  $\pi$  之间变化时,边缘提取的方式是双线型提取,这主要是因为这个范围内的两个环形光瞳滤波器可以近似于二阶差分算子在边缘上进行过零检测<sup>[33]</sup>,而单线的边缘提取类似于一阶差分算子,这种提取会在一定宽度的范围内产生较大的梯度值,导致精准定位受到影响,而二阶差分算子的过零检测可以实现对边缘信息的更精准定位。

为了展示所提出的 OSH 系统对各向异性边缘提取的效果,使用基于双环形光瞳滤波器的 OSH 系统对复杂物体进行各向异性边缘提取的仿真实验。实验依然采用图 5(a)所示的分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  的原始物体,物体位于与透镜  $L_2$  后焦平面的距离为 100 mm 的二维扫描载物台上。实验中采用两个完全相同的环形光瞳滤波器,参数均为  $\omega_0 = 10 \text{ mm}$ 、 $\epsilon = 0.5$ 。因为对复杂物体的各向异性边缘提取中包含的信息较多,为了较明显地体现实验效果,采用方向相反的两次移动方式进行实验。第一次实验中,一个环形光瞳采用偏移距离为 5 mm,偏转角为 0,另一个环形光瞳采用相同的偏移距离,偏转角为  $2\pi$ ,即两个环形光瞳在同一水平线上,相对于中心位置的距离相同;第二次

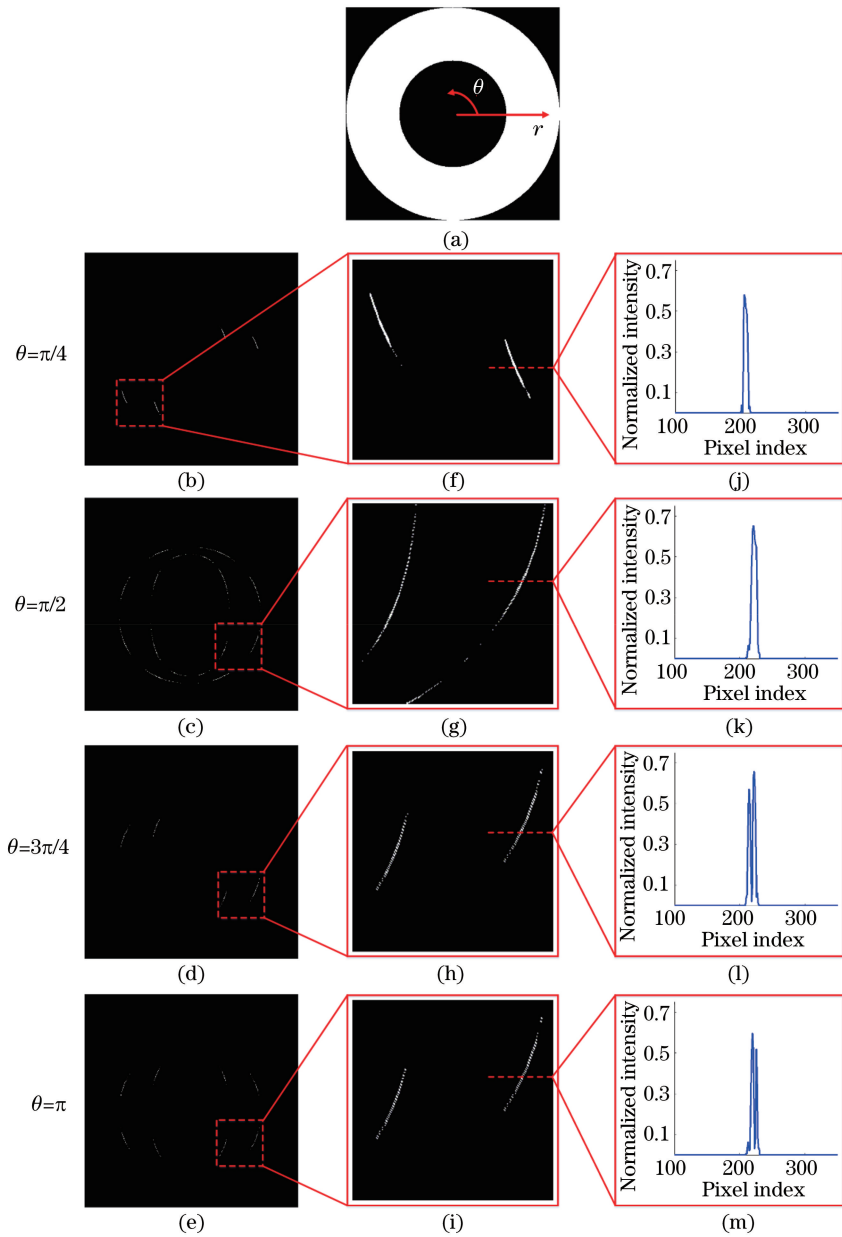


图 6 双环形光瞳滤波器的 OSH 系统重建结果。(a)光瞳平面极坐标示意图;(b)~(e)复分布全息图;(f)~(i)局部复分布全息图;(j)~(m)归一化强度曲线

Fig. 6 Reconstruction results of OSH system with double annular pupil filter. (a) Polar coordinate of pupil plane; (b)-(e) complex holograms; (f)-(i) local complex holograms; (j)-(m) normalized intensities

实验中,一个环形光瞳采用偏移距离为 5 mm,偏转角为  $\pi$ ,另一个环形光瞳采用相同的偏移距离,偏转角为  $3\pi$ ,即两个环形光瞳在同一竖直线上,相对于中心位置的距离相同,实验结果如图 7 所示。可以看到,两种移动方式分别提取到竖直和水平方向的边缘信息,所提取的都是与移动方向垂直的信息,相比于图 5(b)各向同性的边缘提取结果,各向异性的边缘提取图像更完整,且因为两个光瞳的偏转角的夹角为  $\pi$ ,所提取的边缘均为双线性,可以实现对不同方向边缘的更准确提取和定位。在实际应用中,

可以根据需求选择本系统的夹角和移动距离等来提取所需求方向的边缘信息。

## 4 结 论

提出一种在 OSH 系统中采用环形光瞳滤波器进行选择性边缘提取的方法。环形光瞳滤波器在波前工作,可以实现高频信息的有效提取。仿真实验表明,采用单个环形光瞳滤波器时可以实现较好的各向同性边缘提取,而采用双环形光瞳滤波器,通过破坏两个光瞳的对称性,使其产生一定的夹角以实

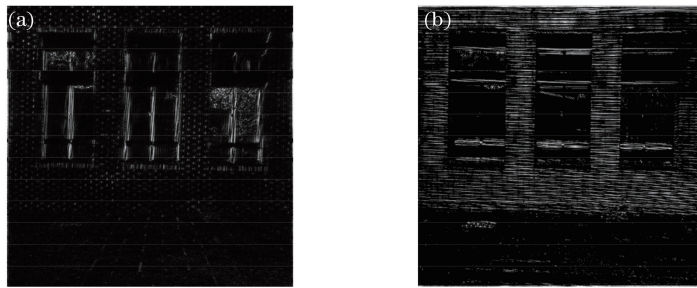


图 7 双环形光瞳滤波器的 OSH 系统对复杂物体的重建结果。(a)第一次重建结果;(b)第二次重建结果

Fig. 7 Reconstruction results of complex object by OSH system with double annular pupil filter.

(a) First reconstruction result; (b) second reconstruction result

现各向异性边缘的选择性提取。此外,通过改变两个环形光瞳滤波器的偏转角,可以实现近似于二阶差分算子在边缘提取中的过零检测,产生双线型边缘提取效果,以实现边缘信息的精准定位。

### 参 考 文 献

[1] Marr D, Hildreth E. Theory of edge detection[J]. Proceedings of the Royal Society B, 1980, 207 (1167): 187-217.

[2] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2002, 24(7): 629-639.

[3] Xiang Y, Ye Q H, Liu J G, *et al.* Retrieve of planetary boundary layer height based on image edge detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (7): 0704003.  
项衍, 叶擎昊, 刘建国, 等. 基于图像边缘检测法反演大气边界层高度[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0704003.

[4] Liu Z M, Zhang Y, Cao S Q, *et al.* Research on image edge feature extraction technique based on hardware description language[J]. Infrared, 2015, 36(11): 19-24.  
刘宗明, 张宇, 曹姝清, 等. 基于硬件描述语言的图像边缘特征提取技术研究[J]. 红外, 2015, 36(11): 19-24.

[5] Zhu H B, Shibata T. A real-time image recognition system using a global directional-edge-feature extraction VLSI processor [C] // Proceedings of ESSCIRC, September 14-18, 2009, Athens, Greece, 2009: 248-251.

[6] Fan J P, Yau D K Y, Elmagarmid A K, *et al.* Automatic image segmentation by integrating color-edge extraction and seeded region growing[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1454-1466.

[7] Ponomaryov V I, Chavez-Roman H, Gonzalez-

Huitron V. Image resolution enhancement using edge extraction and sparse representation in wavelet domain for real-time application [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9139: 91390H.

[8] An V, Oraintara S. A study of relative phase in complex wavelet domain: property, statistics and applications in texture image retrieval and segmentation [J]. Signal Processing Image Communication, 2010, 25(1):28-46.

[9] Gonzalez R C, Woods R E, Masters B R. Digital image processing, third edition [J]. Journal of Biomedical Optics, 2009, 14(2): 029901.

[10] Rahman Z U, Jobson D J. Noise, edge extraction, and visibility of features [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5817: 200-212.

[11] Chavez-Roman O H, Ponomaryov V, Loboda I. Resolution enhancement algorithm based on wavelet and edge extraction techniques in noise presence [C] // International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, June 23-28, 2013, Kharkiv, Ukraine, 2013: 593-595.

[12] Poon T C, Korpel A. Optical transfer function of an acousto-optic heterodyning image processor [J]. Optics Letters, 1979, 4(10): 317-319.

[13] Poon T C. Optical scanning holography - A review of recent progress [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2009, 13(4): 406-415.

[14] Poon T C. Optical scanning holography with MATLAB [M]. Boston: Springer, 2007.

[15] Poon T C. Scanning holography and two-dimensional image processing by acousto-optic two-pupil synthesis [J]. Journal of the Optical Society of America, 1985, 2(4): 521-527.

[16] Sun P, Xie J H. Optical heterodyne scanning holography [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(5): 502-507.

[17] Pan Y J, Jia W, Yu J J, *et al.* Edge extraction using a time-varying vortex beam in incoherent digital

- holography[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(14): 4176-4179.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Khonina S N, Kotlyar V V, Shinkaryev M V, *et al.* The phase rotor filter[J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, 39(5): 1147-1154.
- [21] Fürhapter S, Jesacher A, Bernet S, *et al.* Spiral phase contrast imaging in microscopy [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 689-694.
- [22] Goodman J W, Cox M E. *Introduction to Fourier optics*[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [23] 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.
- [24] Liu L, Deng X Q, Yang L S, *et al.* Effect of an annular pupil filter on differential confocal microscopy [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(23): 1711-1713.
- [25] Zhang Q G. Super-resolution of digital holography microscopic imaging theory and experimental research based on annular aperture filter [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.  
张巧鸽. 基于环形光瞳滤波器的超分辨数字全息显微成像理论与实验研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [26] Sheppard C J R, Choudhury A. Annular pupils, radial polarization, and superresolution [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(22): 4322-4327.
- [27] Xu Y S, Singh J, Sheppard C J R, *et al.* Ultra long high resolution beam by multi-zone rotationally symmetrical complex pupil filter [J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 6409-6413.
- [28] Poon T C. Real-time preprocessing of holographic information [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(11): 3174.
- [29] Duan Z Y, Luo X F, Yang X. Edge extraction algorithm based on anisotropic diffusion filtering [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2014, 36(4): 421-425.  
段振云, 罗晓凤, 杨旭. 基于各向异性扩散滤波的边缘提取算法 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2014, 36(4): 421-425.
- [30] Wang H Y, Lin K P, Lin H D, *et al.* Anisotropic filtering technique for PET image edge extraction [C] // *Proceedings of the 22nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, July 23-28, 2000, Chicago, IL, USA, 2000: 498-500.
- [31] Wang D. Image edge detection method based on anisotropic gaussian filtering [D]. Xi'an: Xidian University, 2010.  
王丹. 基于各向异性高斯滤波的图像边缘检测方法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [32] Vermande P, Buil C, Delbru F. Interferometric spectro-imager system (ISIS) [C] // *Optical Systems for Space Applications*, September 18, 1987, 1987: 117-125.
- [33] Yang X, Jia W, Wu D, *et al.* On the difference between single- and double-sided bandpass filtering of spatial frequencies [J]. *Optics Communications*, 2017, 384: 71-77.