

光学图像边缘检测技术研究进展

刘世凯, 周志远*, 史保森**

中国科学技术大学光学与光学工程系, 中国科学院量子信息重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 随着光学信息处理技术的发展, 图像边缘检测技术在光学高对比度成像、自动驾驶、人脸识别、天文观测等领域得到了广泛的应用。光学边缘检测主要是借助 4-f 空间滤波成像系统, 通过在傅里叶平面上加载滤波器来修改图像的频谱信息, 进而实现物体边缘轮廓的提取。介绍了几种不同光学图像边缘检测方式, 进行了简要的理论分析, 并总结了国内外的相关研究进展。

关键词 模拟光学图像处理; 空间滤波; 边缘检测; 模式识别

中图分类号 O438.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011014

Progress on Optical Image Edge Detection

Liu Shikai, Zhou Zhiyuan*, Shi Baosen**

Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, Optics and Optical Engineering Department, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract With the development of optical information processing technology, image edge detection has been widely used in optical high-contrast imaging, automatic driving, face recognition, astronomical observation and other fields. Optical edge detection mainly employs 4-f spatial filtering imaging system with a filtering element in a Fourier plane to modify the spectral information of the image, which results in a strong edge enhancement of object structures. In this paper, several different methods of optical image edge detection and their theoretical analyses are demonstrated. Besides, relevant research progresses at home and abroad are reviewed.

Key words analog optical image processing; spatial filtering; edge detection; pattern recognition

OCIS codes 100.1160; 100.5010; 070.6110

1 引言

边缘检测作为一种表征物体边界的有效方法, 在图像检测和模式识别等方面发挥着至关重要的作用^[1-5], 是图像处理、机器视觉和智能识别应用中必不可少的工具。光学边缘检测技术主要基于 4-f 成像系统并结合一系列滤波元件, 利用透镜的傅里叶变换效应, 通过各种滤波方法对图像的频谱信息进行加工处理, 进而提取有用的高阶信息、消除无关的基频信息来增强物体的边缘轮廓。该技术有助于增

强图像信息的可读性和最大限度地简化数据处理过程, 进而改进特征抽取、图像分割、匹配和识别的可靠性。相比计算机数字边缘检测方法^[6-9], 光学边缘检测具有速度快、能耗低、可并行处理和信息容量大的优点^[10-18]。

光学边缘检测技术的发展历程很大程度上取决于光模拟滤波算法的改进和滤波器性能的提升。在发展初期阶段, 虽然人们对实现新型的边缘检测算法^[6-9]和技术^[19-22]做了一系列探索, 但图像边缘背景噪声的滤除和图像的对比度效果仍然不尽如人意,

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-03-24; 录用日期: 2021-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(11934013, 92065101)、安徽省引导专项(AHY020200)

* E-mail: zyzhouphy@ustc.edu.cn; ** E-mail: drshi@ustc.edu.cn

因此迫切需要一种既能实现低背景噪声又能实现高对比度的边缘增强方法。本文详细介绍了光学边缘检测技术的发展、基本原理和改进方案,总结了国内外的最新相关研究进展。

2 涡旋相衬增强成像

自 1942 年 Zernike^[19] 提出相衬增强显微术以来,由于存在背景噪声较大的缺点,人们不断改进滤波方法来提高图像对比度。1978 年 Bracewell 等^[23] 提出基于希尔伯特变换以及分数希尔伯特变换的空间滤波运算,实现一维的边缘增强。为了实现各向同性的边缘增强,Davis 等^[24] 在 2000 年利用径向对称的希尔伯特变换,通过在液晶空间

光调制器加载一种拓扑荷数 $l=1$ 、空间相位为 $\exp(i\varphi)$ 的涡旋相位结构实现了圆形小孔的二维边缘增强,这标志着涡旋相衬增强 (SPC) 技术的诞生。2005 年 Bernet 等^[11] 将该技术应用于显微成像系统,实现了振幅型和相位型物体的二维边缘增强。图 1 从边缘对比度角度,将 SPC 成像与几种传统成像方式进行了比较,显示出其独特的优势。SPC 技术在显微成像领域的应用与发展极大地推动了人们对生命现象的研究与认知,包括增强细胞内部形貌的阴影(浮雕)效应^[25]、结合受激发射损耗荧光显微镜 (STED) 的超分辨边缘增强成像^[26] 以及小型手持式 SPC 显微镜^[27] 等。

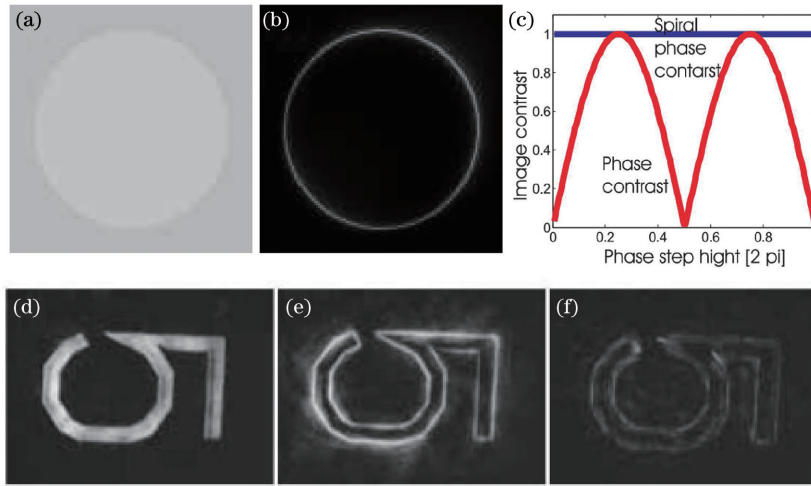


图 1 SPC 成像与其他成像方式的对比结果^[11]。(a)和(b)相衬增强成像与 SPC 成像的模拟结果;(c)采用两种不同方式对应的成像对比度随着物体不同相位梯度的变化;(d)吸收样品的亮视场成像;(e)SPC 成像结果;(f)暗视场图像

Fig. 1 Comparison results between SPC imaging and other imaging methods^[11]. (a) and (b) Simulation results of phase contrast imaging and SPC imaging, respectively; (c) change of imaging contrast with different phase gradients of objects in two different methods; (d) bright-field image of absorbing sample; (e) SPC imaging result; (f) dark-field image

2.1 基本原理

基于 SPC 成像的基本理论描述如图 2 所示,实验装置的核心是一套 4-f 涡旋相衬成像系统,它由两个透镜和放置在频谱面上的涡旋相位板(VPP)构成。物体输入光场可以写成 $E_{obj}(r, \phi)$, 经过第一个透镜 L1 实施傅里叶变换后,在后焦面的光场可以写成 $E_{obj}(\rho, \varphi) = \mathcal{F}[E_{obj}(r, \phi)]$, \mathcal{F} 代表傅里叶变换操作。作为空间滤波衍射元件的涡旋相位滤波片的透射函数为 $F(\rho, \varphi) = \text{circ}(\rho/R) \exp(il\varphi)$, 其中 R 为圆域函数 $\text{circ}(\rho/R)$ 的孔半径, l 为 VPP 的拓扑荷数, φ 为垂直于光传播方向的空间方位角。经过涡旋滤波片后,在傅里叶面的光场可以写成 $E_t(\rho, \varphi) = F(\rho, \varphi) \cdot \mathcal{F}[E_{obj}(r, \phi)]$, 其中 \cdot 为点乘

运算。再经过第二个透镜 L2 进行逆傅里叶变换后最终得到滤波后像面上的场分布为

$$E_{\text{image}}(r, \phi) = \mathcal{F}[F(\rho, \varphi)] * E_{\text{obj}}(r, \phi), \quad (1)$$

式中, $*$ 为卷积运算符, $\mathcal{F}[F(\rho, \varphi)]$ 为点扩展函数 (PSF), 即螺旋相位滤波器的傅里叶变换。由此可见,携带物体信息的光场经过涡旋相位的调制后在像面上其能量发生了重新分布。在进行卷积计算时,利用 PSF 对图像中的每一个像素进行加权处理。

对于 $l=1$ 的涡旋相位滤波器,可以用于各向同性的二维边缘增强。在平坦区域(相位或振幅均匀分布),任何相邻两点间的振幅或相位梯度为 0,导致了 π 的固定相位差,产生相消干涉。而在边缘轮

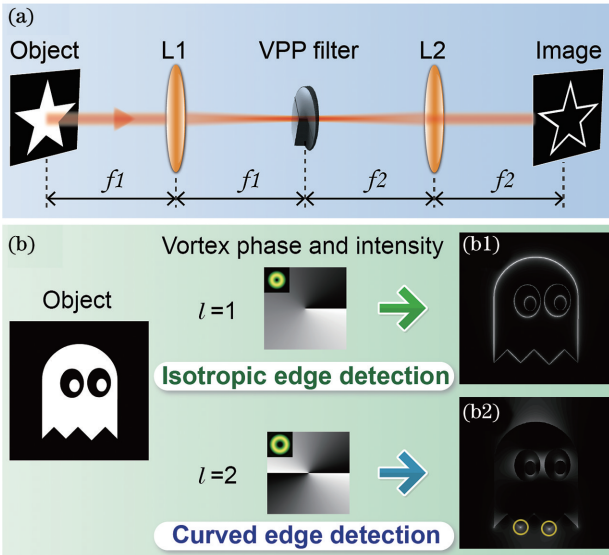


图 2 SPC 成像原理演示^[28]。(a)4-f 滤波成像系统构建；
(b)各向同性及曲边边缘增强模拟结果
Fig. 2 Schematic illustration of SPC imaging^[28].
(a) Generic setup of a 4-f filtering system;
(b) simulation results of isotropic and curved edge enhancement

廓区域,即存在相位和振幅梯度,相消干涉过程不完美,导致了被增强的边缘信号的产生。然后再对被照明目标物体的整个区域进行积分,最后即可得到各向同性的全局边缘增强的图像。VPP 的作用可以看作是一维希尔伯特变换的径向对称的二维推广,因为每条经过 VPP 奇异点的直线都对应一个一维变换滤波器^[24]。选择不同拓扑荷数的涡旋相位用于频谱滤波可实现特定类型的边缘检测。对于 $l=2$ 的滤波器来说,其更适合特定区域(直角边缘)的边缘增强^[10],并且由于涡旋相位的加倍,导致均匀部分不再满足 π 的固定相位差,不能完全相消干涉。分束阶拓扑荷的涡旋相位结构可以用于只强调某一方向的一维各向异性边缘增强成像^[29]。本质上,所有不同 l 阶数的边缘检测操作都可以看作是一种空间滤波方法,可以通过相移、衰减或滤除等方式选择性地操纵特定的空间频率。同时,更高 l 值的滤波器为高维轨道角动量(OAM)光谱空间提供了一种潜在的特征分析方法^[30-32],未来可用于人脸识别、光学字符识别和视觉中的人工智能等领域。

2.2 改进方法

由于标准 SPC 成像系统的 PSF 存在亚震荡,边缘附近产生的背景噪声会降低边缘对比度,因此人们提出一系列改进滤波相位全息图的方法来解决该问题,比如采用空间光调制器(SLM)替代传统的

VPP,通过编码为拉盖尔-高斯模式、类贝塞尔型振幅调制模式、艾里光束模式等方式来压制 PSF 的边带进而提高边缘成像对比度^[33-35]。以上方式虽然一定程度提升了边缘对比度,但依然无法做到完全消除噪声。值得一提的是山东师范大学蔡阳健研究团队提出一种针对空间滤波器的逆向设计方法:通过在 x 和 y 方向单独设计无亚震荡的 PSF 实现了高对比度和高分辨率的边缘图像,如图 3 所示。这项工作为进一步改进和调整滤波器的相位结构,进而完全消除图像边缘噪声并产生高对比度的边缘提供了新的思路^[36]。

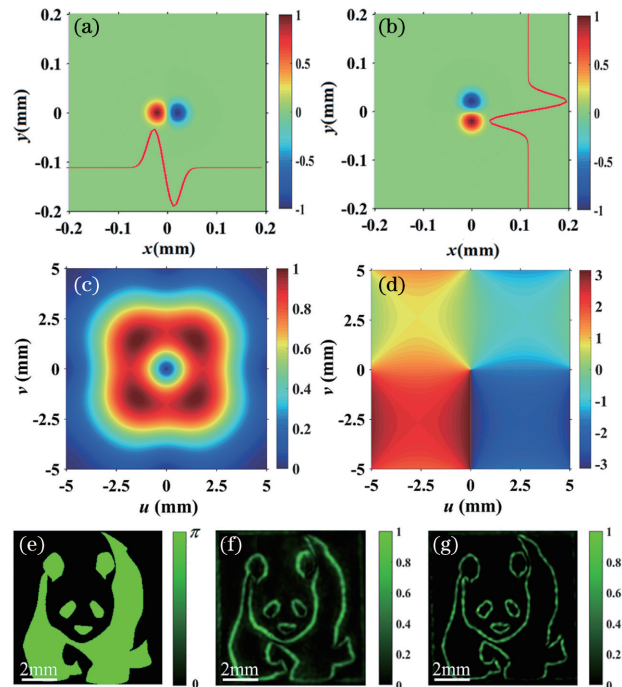


图 3 逆向设计优化的边缘增强成像系统的相关特性及结果^[36]。(a)和(b)PSF 实部和虚部的强度图；
(c)和(d)空间滤波函数的振幅和相位分布；(e)熊猫的相位物体；(f)SPC 实验结果；(g)逆向设计滤波器的实验结果
Fig. 3 Characteristics and results of an edge enhancement imaging system by inverse design^[36]. (a) and (b) Density plots of the real and imaginary parts, respectively, of the PSF; (c) and (d) amplitude and phase distribution of the spatial filter function; (e) phase object of a panda; (f) experimental result of SPC; (g) experimental result of inverse-designed filter

3 基于微纳结构和器件的边缘检测

除了 SPC 的边缘检测方式之外,人们又提出了诸如基于光子的自旋霍尔效应^[13,37-43]、古斯汉森效

应^[44]以及布儒斯特效应^[16,45]等一系列新颖的图像边缘检测方式,利用的滤波器包括但不限于棱镜^[13,16,44-45]、金属表面等离激元^[14]、超表面^[39-43]、光栅^[46-48]和光子晶体^[49]等。其中,微纳光学结构和器件由于具有紧凑小巧、易集成、多功能等优势,未来在实现光计算(微分、卷积)等方面有望逐渐取代传统涡旋或振幅滤波器,这些光学信息处理方式在高速并行计算^[49-51]、大吞吐量图像处理(卫星和医学图像)^[52-53]、相位提取^[54]、目标识别^[39,42]等领域有重要的应用前景。

2017 年,浙江大学阮智超课题组与斯坦福大学

的 Fan 合作^[14],实现了基于金属表面等离激元的空间微分器,并演示了利用微纳结构对光场图像的边缘提取,如图 4 所示。另外,二维人工结构材料-超构表面具有优异的波前调控能力和超薄超轻特性,可以实现紧凑的集成轻量化显微系统,可应用于生物医学的边缘成像。例如,2020 年南京大学徐挺团队^[18]设计了一种新型自旋复用的涡旋相位超表面结构,实现了入射偏振相关的可切换图像模式的宽谱边缘增强成像,即左旋圆偏振(LCP)光入射成像系统显示为常规图像模式,而右旋圆偏振(RCP)光入射成像系统可切换为边缘检测模式,如图 5 所示。

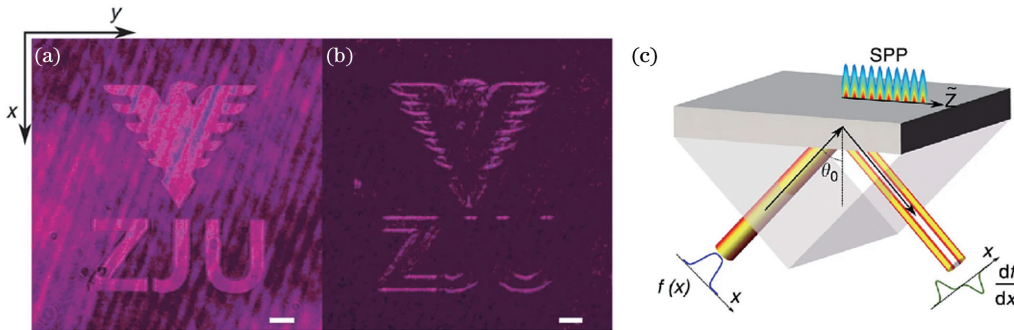


图 4 表面等离激元空间微分器的原理演示及实验结果^[14]。(a)入射强度图像;(b)反射后的边缘检测强度图像;(c)用于激发表面等离激元的表面等离激元空间微分器的原理演示

Fig. 4 Principle demonstration and experimental results of surface plasmonic spatial differentiator^[14]. (a) Incident intensity image; (b) reflected edge detection intensity image; (c) schematic of surface plasmonic spatial differentiator to excite surface plasmon polariton

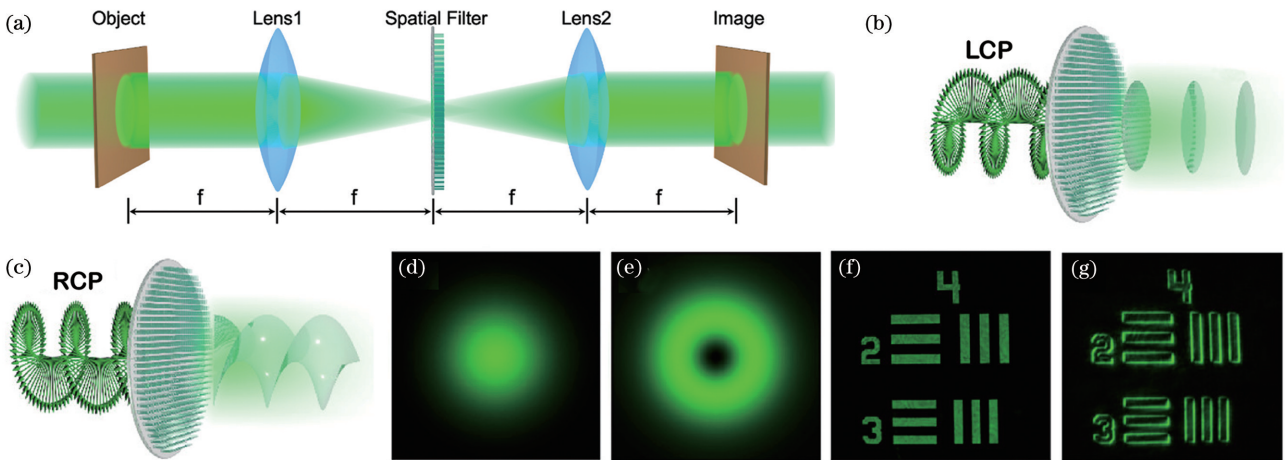


图 5 基于光子自旋复用超表面的可切换 SPC 成像^[18]。(a)用于空间滤波的傅里叶变换装置原理图;(b) LCP 的平面波入射超表面,出射为携带一初始相位的 RCP 波;(c) RCP 波入射超表面,出射为携带拓扑核为 $l=1$ 的涡旋相位的 LCP 波;(d) 高斯光强度分布图;(e) $l=1$ 时,OAM 光强度分布图;(f) 4-f 亮场成像实验结果;(g) SPC 成像的实验结果

Fig. 5 Switchable SPC imaging based on photonic spin-multiplexing metasurface^[18]. (a) Schematic of Fourier transform system for spatial filtering; (b) LCP plane wave passing through the metasurface becomes a RCP wave carrying an initial phase; (c) RCP wave passing through the metasurface becomes a LCP wave carrying the vortex phase with the topological kernel of $l=1$; (d) Gaussian light intensity distribution; (e) intensity distribution of OAM light with $l=1$; (f) experimental results of 4-f bright field imaging; (g) experimental results of SPC imaging

3.1 超表面实现边缘检测的基本原理

微纳加工技术的发展促进了各类新材料和结构的发展,其中又以超表面的发展最为突出。基于微纳结构和器件的边缘检测主要基于光子自旋霍尔效应^[13,37-43],因此本小节以 Pancharatnam-Berry(PB)相位电介质超表面为代表,探究边缘检测的基本原理。PB 相位是一种与光的偏振态变化有关的相位^[55-56],具有自旋相关的性质,同时也是产生光自旋霍尔效应的有效途径之一。下面分别讨论一维与二维边缘检测两种情况。

超表面将一束水平线偏振光分裂为 LCP 和 RCP,且两光束存在一定的横向位移,沿不同方向传输。当生成的位移足够小,中间重叠的部分包含 LCP 和 RCP 两种分量,合成后依然是水平线偏振光,但边缘部分只含有 LCP 或 RCP 成分,因此可以用竖直方向的检偏器将中间实心部分滤除仅留下外侧的边缘信息,如图 6(a)所示。成像系统由 4-f 系统组成,图 6 中的透镜 L1 用于实现目标光场的傅里叶变换。超表面位于 4-f 系统的傅里叶平面上,即物体的傅里叶谱所在的位置。透镜 L2 对经超表面修正的光谱进行逆傅里叶变换,在其后焦平面生成边缘信息。这个特殊设计的相位梯度超表面与

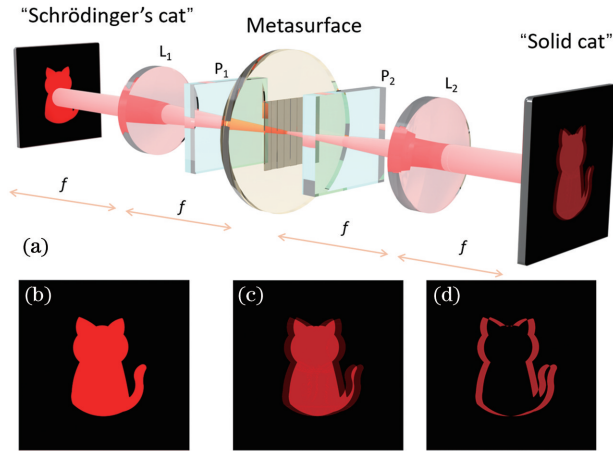


图 6 经典光场景下,超表面实现边缘检测的光路图以及对应的模拟结果^[57]。(a)基于使用偏振滤波的超表面的 4-f 成像系统;(b)目标物体为“Schrödinger 的猫”;(c)“实心猫”的常规模式;(d)“轮廓猫”的边缘检测模式

Fig. 6 Experimental setup and simulation results of metasurface enabled classical edge detection in classical light^[57]. (a) 4-f imaging system based on metasurface using polarization filtering; (b) object target is the “Schrödinger’s cat”; (c) regular mode of a “solid cat”; (d) edge detection mode of an “outlined cat”

偏振变化有关,是由旋转人造微结构的局部光轴方向产生的。由于超构表面的方向是局部变化的,可以用与位置相关的 Jones 形式来描述。局部光轴空间变化,相位延迟恒定为 π 的超构表面的 Jones 矩阵可表示为

$$T_0 = \begin{bmatrix} \cos 2\varphi & \sin 2\varphi \\ \sin 2\varphi & -\cos 2\varphi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, $\varphi(x) = \pi x / \Lambda$ 为局部光轴的方向角(假设相位梯度方向沿 x 轴), Λ 为超构表面的周期。起偏器 P1 水平放置,物体光场为水平偏振态,定义为 $E_{\text{obj}}(x, y) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。为了简化模型,先考虑入射光中的 RCP 分量,其经过第一个透镜后电场可以写成 $E_{\text{Fourier}}(u, v) = \mathcal{F}[E_{\text{obj}}(x, y)]|R\rangle$,其中 $u = x'/\lambda f$, $v = y'/\lambda f$, x' 和 y' 为傅里叶平面的实空间坐标, λ 是工作波长, f 为透镜的焦距, $|R\rangle = (1 \ i)^T$ 代表 RCP 光的右矢形式。在经过超构表面后引入了一个额外的相位 2φ (PB 相位),使得输出光束的自旋反转,变为 LCP 光。经过透镜 L2 傅里叶变换到像面,图像的场分布为

$$E_{\text{img,LCP}}(x, y) = \mathcal{F}[T_0 \times E_{\text{Fourier}}(u, v)] = \mathcal{F}\{\mathcal{F}[E_{\text{obj}}(x, y)] * \delta(x - \Delta) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}\} = E_{\text{obj}}[(x - \Delta), y] |L\rangle, \quad (3)$$

式中, $*$ 表示卷积运算,图像的位移量为 $\Delta = \lambda f / \Lambda$ 。采用同样的方式处理输入光场中的 LCP 分量,用矩阵光学表示为 $|L\rangle = (1 \ -i)^T$ 。此时经过超表面加载的 PB 相位可以写成 -2φ ,其中负号由 PB 相位的自旋相关特性决定。经过成像系统后最终的输出光场可写成

$$E_{\text{img,RCP}}(x, y) = E_{\text{obj}}[(x + \Delta), y] |R\rangle. \quad (4)$$

由于水平线偏振光可以看作 LCP 和 RCP 分量的线性叠加,因此左旋和右旋的位移图像各自沿着一定的夹角呈现在像面上,总的图像分布为

$$E_{\text{img}}(x, y) = E_{\text{obj}}[(x - \Delta), y] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + E_{\text{obj}}[(x + \Delta), y] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad (5)$$

检偏器放置在超表面空间微分器后,检偏方向与入射线偏振方向垂直,输出的电场可以写为

$$E_{\text{edge}}(x, y) = (E_{\text{obj}}[(x - \Delta), y] - E_{\text{obj}}[(x + \Delta), y]) \begin{bmatrix} 0 \\ i \end{bmatrix}, \quad (6)$$

此时输出电场振幅的绝对值可以近似写成输入电场

的一阶空间微分

$$E_{\text{edge}}(x, y) = 2\Delta \frac{\partial E_{\text{obj}}(x, y)}{\partial x}, \quad (7)$$

输出边缘图像的光强为 $I_{\text{out}} = |E_{\text{edge}}(x, y)|^2$, 对应的模拟结果为“轮廓猫”, 如图 6(d) 所示。当检偏器保持为水平偏振滤波时, 对应的模拟结果为带有一定横向位移的“实心猫”, 如图 6(c) 所示。

基于超构表面的二维边缘检测方案也已实现^[42-43], 原理上与一维边缘检测类似。只需要重新设计 PB 相位, 使得 LCP 和 RCP 分量沿着径向方向产生相对位移, 进行偏振滤波后, 边缘信息会同时显现出 x 方向和 y 方向的信息, 对应极坐标系 (r, φ) 中的结论公式为

$$E_{\text{edge}} = 2\Delta \frac{\partial E_{\text{obj}}(r, \varphi)}{\partial r}. \quad (8)$$

由(7)式和(8)式可以看出, 基于自旋霍尔效应的超表面可以同时实现一维和二维的一阶空间微分以及边缘检测。此外, 轻薄、易集成化和高分辨率的特点使其在未来发展小型化和高对比度成像系统方面更具优势。

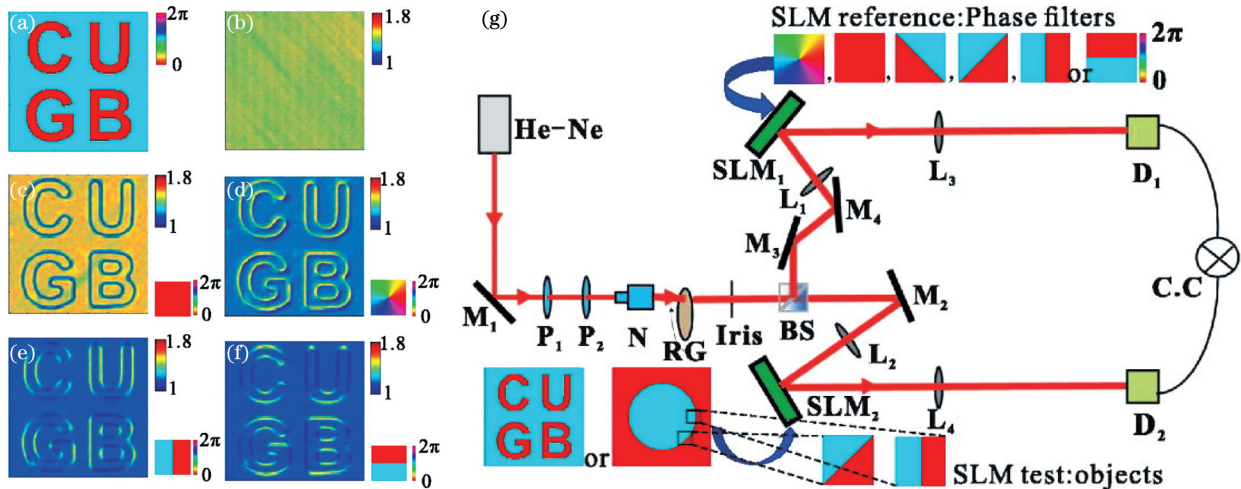


图 7 非相干热光源构建的非局域边缘增强成像系统^[12]。(a) 相位物体; (b) D2 平面内直接成像的强度分布; (c)~(f) 使用不同相位滤波器的相位物体边缘增强鬼图像; (g) 相位物体热光边缘增强鬼成像光路图

Fig. 7 Non-local edge enhancement imaging system with incoherent thermal light^[12]. (a) Phase object; (b) intensity distribution of direct imaging in D2 plane; (c)~(f) edge enhanced ghost images of the phase object with different phase filters; (g) schematic of the thermal light edge enhancement ghost imaging of phase objects

叶变换, 可以直接得到物体的边缘信息^[15]。

此外, 光学边缘检测技术不仅仅应用于经典强光领域, 它与量子光源的交叉融合带来了更多新奇丰富的现象。2009 年格拉斯哥大学的 Padgett 等利用晶体自发参量下转换过程产生的信号和闲散光子之间的位置以及 OAM 的相关性, 将物体与涡旋相位滤波器分两路放置, 通过扫描两路收集端的点探

4 边缘检测在各类成像方式中的应用

光学边缘检测技术与各类成像技术相结合将极大地扩展其应用范围, 相关研究工作包含了从经典领域到量子领域、从线性领域到非线性领域。在经典光学中, 边缘检测通常在可见光或红外波段的单光束相干光源照射下进行。中国地质大学高禄团队用非相干热光源构建了非局域边缘增强成像系统, 如图 7 所示, 将被检测物体和采用的螺旋相位滤波器非局域地放置在两束分离的光束中, 通过二阶强度相关测量, 可以得到相位物体的边缘增强的鬼影图像。通过对贝尔不等式的测量, 证明了所提出的边缘增强鬼成像系统的空间自由度的非经典性质^[12]。另外, 边缘检测技术还扩展到了计算成像领域^[58-61]; 中国科学技术大学龚磊等将涡旋相衬成像技术扩展到了单像素成像领域^[62], 实现了单点探测器提取物体相位或强度的图像边缘新技术。他们通过单像素相机在波矢空间扫描螺旋相位编码平面波, 结合四步相移法和同步强度测量, 直接获取边缘增强目标的傅里叶谱, 再对得到的频谱进行逆傅里

测器的符合数据, 在量子鬼成像方案中实现了目标物体的非局域边缘增强成像^[63]。2016 年, 该研究组利用多像素阵列相机取代成像端的点探测器, 展示了具有非局域特性的宽场涡旋相衬成像系统, 并且证明相比标准相衬成像技术, 前者只需更少的光子即可对相位物体进行成像^[64], 如图 8 所示。2019 年, 该研究组在原来量子鬼成像方案的基础上, 通过

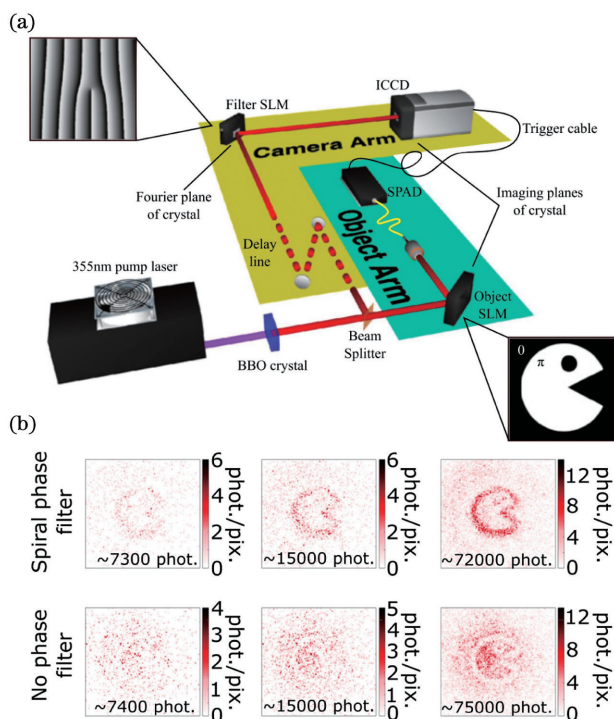


图 8 非局域边缘增强的宽场涡旋相衬成像系统^[64]。(a) 实验示意图；(b) 随着光子数的增加，相位物体“吃豆人”的标准亮场成像与 SPC 成像实验结果

Fig. 8 Full-field, phase-contrast imaging system with non-local edge enhancement^[64]. (a) Experimental schematic; (b) experimental results of the pacman phase object for an increasing number of photons using standard bright field imaging or SPC imaging, respectively

宽场成像的方式证明了边缘增强的图像可以用于证明量子纠缠违背贝尔不等式^[65]。

2020 年中国科学技术大学史保森教授研究组与湖南大学罗海陆团队、加州大学圣地亚哥分校 Liu 团队合作，利用基于 Sagnac 环结构的高品质偏振纠缠源^[66-67]和激光直写的高效电介质超表面^[41]，通过改变纠缠光子对中触发光子的偏振状态和图像符合测量实现了成像模式在正常模式和边缘探测模式的远程切换，如图 9 所示，并且证实了在弱光场照明下，纠缠光子照明相对于直接单光子照明具有更高的信噪比^[57]。

目前，量子边缘增强成像技术主要基于鬼成像方案，要求光子源具有高空间关联性，因而实验上通常选用块状偏硼酸钡(BBO)薄晶体和大孔径平行光泵浦，故存在光子对产生效率低、数据采集耗时等问题。针对这一技术难题，史保森研究组将预报单光子成像技术引入 SPC 技术中，实现了基于周期极化磷酸氧钛钾(PPKTP)准相位匹配晶体的高亮度量

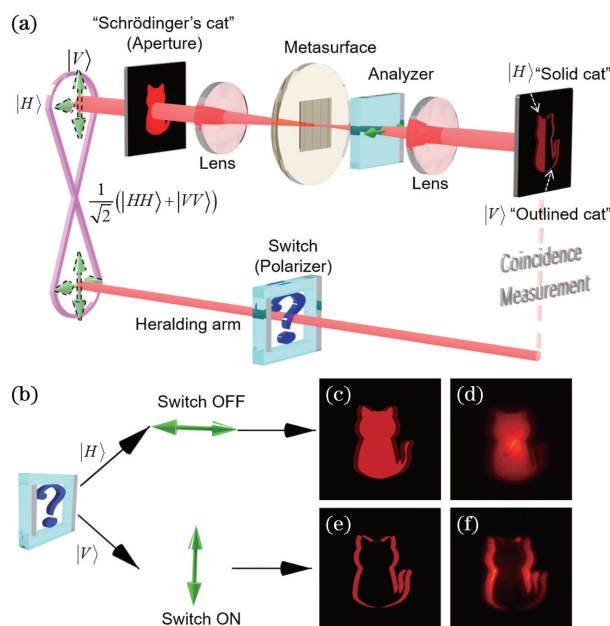


图 9 基于超表面的量子可切换边缘检测^[57]。(a) 实验装置简图；(b) 预报端的边缘开关状态，当预报端空闲光子投射到 $|H\rangle$ 时，表示关闭状态，对应标准亮场模式，当空闲光子被投射到 $|V\rangle$ 时，表示开启状态，对应边缘检测模式；(c) 和 (d) 模拟和实验的常规图像；(e) 和 (f) 模拟和实验的边缘图像

Fig. 9 Quantum switchable edge detection based on metasurface^[57]. (a) Experimental schematic; (b) switch state ON or OFF of the heralding arm. When the idler photons of the heralding arm are projected to $|H\rangle$, it indicates the switch OFF state and leads to a bright field mode. While the idler photons are projected to $|V\rangle$, it indicates the switch ON state and leads to an edge detection mode; (c) and (d) calculated and experimental results of regular images, respectively; (e) and (f) calculated and experimental results of edge enhanced images, respectively

子预报光源照明下物体的高效实时(0.5 Hz)边缘检测。除了全局各向同性的边缘增强，他们还验证了对物体特定特征的提取识别，包括曲线边缘增强和定向阴影效应。利用光子对紧凑的时间关联特性及增强型电荷耦合器件(ICCD)相机的光子计数模式，实验结果无需后处理即显示出了高保真和低噪声的优势，如图 10 所示。与直接成像相比，预报单光子成像方案可以显著提高信噪比。该工作为弱光场下活体生物样品的高对比度成像提供了一种新的解决方案^[28]。

在非线性领域，为解决传统红外图像探测器效率低、分辨率低以及设备复杂等缺点，人们通常通

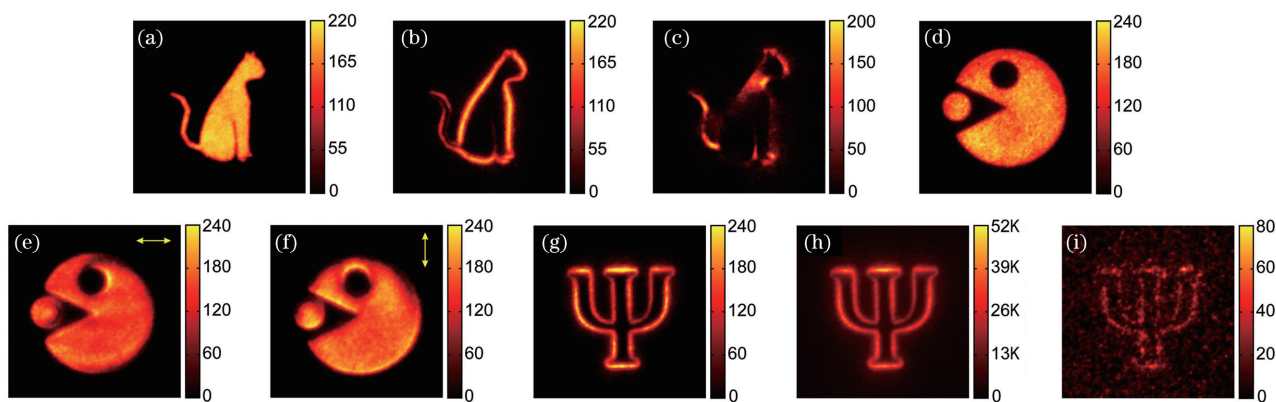


图 10 基于 VPP 的量子边缘增强成像实验结果^[28]。(a)猫图案的标准亮场图像;(b)使用拓扑荷 $l=1$ 的 OAM 滤波器的各向同性边缘增强图像;(c)使用拓扑荷 $l=2$ 的 OAM 滤波器的曲线边缘增强图像;(d)“吃豆人”图案的标准亮场图像;(e)~(f)水平及竖直方向图像的阴影效应,箭头代表阴影方向;(g)~(i)不同工作模式的边缘增强图像结果对比,按序分别对应光子计数模式、传统光强模式、内部触发模式。所有图像右侧显示色条对应不同的光子计数

Fig. 10 Experimental results of quantum edge enhancement imaging based on VPP^[28]. (a) Standard bright field image of a cat pattern; (b) isotropic edge enhanced image using OAM filter of topological charge $l=1$; (c) curved edge enhanced image using OAM filter of topological charge $l=2$. (d) standard bright field image of a pacman pattern; (e)–(f) images of shadow effect from horizontal and vertical directions, respectively, arrow indicates the shadow direction; (g)–(i) comparison of edge enhanced image results with different working modes, corresponding to photon counting mode, traditional light intensity mode and internal trigger mode, respectively. The color bars on the right side of all images represent different photon counts

过频率转换的方法,将红外图像信息转换到可见光波段,再使用效率高、分辨率高、设备简单且价格低的可见光探测器进行图像采集。2018 年厦门大学陈理想教授课题组和哈尔滨理工大学朱智涵等合作^[68],基于傅里叶空间中非线性晶体的倍频效应,

将待测物体的频谱和一束 OAM 光进行倍频,从而将传统的 SPC 技术推广到了非线性光学领域,在实验上实现了不可见光(1064 nm)照射下相位物体边缘增强的可视化(532 nm),如图 11(a)和图 11(b)所示。随后,合作团队的方案于 2019 年被推广到和

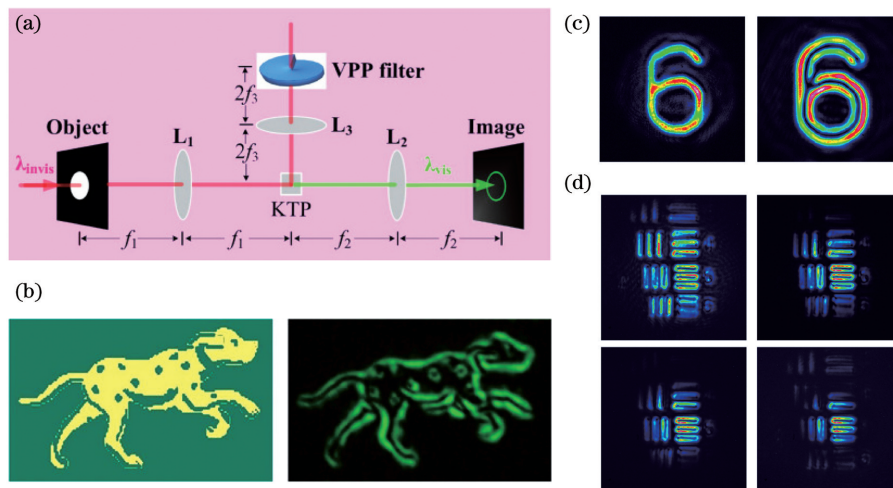


图 11 基于二阶非线性过程的 SPC 上转换成像。(a)非线性 SPC 成像原理示意图^[68];(b)相位物体非线性边缘增强的实验结果^[68];(c)强度物体非线性边缘增强的实验结果^[73];(d)调控晶体温度,改变相位失配,边缘增强图像的不同视场变化^[73]

Fig. 11 SPC up-conversion imaging based on second-order nonlinear processes. (a) Schematic diagram of nonlinear SPC imaging^[68]; (b) experimental results of nonlinear edge enhancement of phase objects^[68]; (c) experimental results of nonlinear edge enhancement of intensity objects^[73]; (d) different field of view changes of edge enhanced images by adjusting crystal temperature for changing phase mismatch^[73]

频领域,中国科学技术大学史保森团队结合先前组内积累的准相位匹配调控光斑视场角技术^[69]及结构光场的非线性频率变换技术^[70-72],实现了 1550 nm 照射下物体在 792 nm 涡旋光泵浦条件下,最终图像上转换到 525 nm 的边缘检测^[73]。同时通过精确调控晶体温度,即改变非线性相位匹配条件,还实现了最大 2.1 倍的成像视野调节范围,如图 11(d)所示。并且该调控方式相比其他非线性图像视场调控,例如使用宽谱光源^[74]、双波长照明^[75]、晶体温度梯度^[76]、精确转动晶体角度^[77]等方式,具有操作更加简单方便且对光源要求低的优点。这项新技术展示了边缘增强与视场增强并行的图像处理方式,相比传统红外探测器还具有成本低廉的优点,在生物成像、模式识别以及红外遥感等领域具有重要的潜在应用价值。

5 总结与展望

基于光模拟算法的边缘检测具有高效、平行运算、实时处理、低功耗的优势。其中,一维和二维边缘检测技术相应的理论和实验验证均得到广泛发展,这些方法在产生高对比度图像、生物显微相衬增强成像、智能识别等方面具有潜在应用。同时,相关应用研究也从经典光领域延伸到了量子光学领域,为生物细胞组织的非破坏性高对比度成像提供了一个有利的工具。尤其近几年来,随着微纳加工技术的突飞猛进,如何发展更为紧凑小巧的集成光学边缘检测器成为了一个新的研究热点,这将促进未来的自动驾驶^[78]、人工智能识别^[79]、虚拟和增强现实^[80]等领域的发展。

目前,对于含有大信息量的复杂三维物体及彩色物体的边缘检测仍缺乏报道,有待于进一步研究。相信随着相关技术的不断研发和改进,并结合一系列先进的成像方式和算法,这些难题终将被解决。此外,微纳技术的发展也催生了一系列具有优秀光计算能力的新颖材料,边缘检测系统的质量和体积正在逐渐微型化。最终,将光学边缘检测技术真正服务于生物成像领域,或面向于集成到商用相机的模块,形成可实用化的新型边缘检测器。

参 考 文 献

- [1] Fua P, Leclerc Y G. Model driven edge detection[J]. *Machine Vision and Applications*, 1990, 3(1): 45-56.
- [2] Abdel-Qader I, Abudayyeh O, Kelly M E. Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2003, 17(4): 255-263.
- [3] Shrivakshan G T, Chandrasekar C. A comparison of various edge detection techniques used in image processing [J]. *International Journal of Computer Science Issues*, 2012, 9(5): 269-276.
- [4] Aquino A, Gegúndez-Arias M E, Marín D. Detecting the optic disc boundary in digital fundus images using morphological, edge detection, and feature extraction techniques [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2010, 29(11): 1860-1869.
- [5] Al-Jarrah R, Al-Jarrah M, Roth H. A novel edge detection algorithm for mobile robot path planning [J]. *Journal of Robotics*, 2018: 1-12.
- [6] Eschbach R, Knox K T. Error-diffusion algorithm with edge enhancement [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, 8(12): 1844.
- [7] Hou Z J, Wei G W. A new approach to edge detection [J]. *Pattern Recognition*, 2002, 35 (7): 1559-1570.
- [8] Lai J Z C, Chen C C. Algorithms of halftoning color images with edge enhancement [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2003, 14 (4): 389-404.
- [9] Chung K L, Pei S C, Pan Y L, et al. A gradient-based adaptive error diffusion method with edge enhancement [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(3): 1591-1601.
- [10] Ritsch-Marte M. Orbital angular momentum light in microscopy [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, 375(2087): 20150437.
- [11] Fürhapter S, Jesacher A, Bernet S, et al. Spiral phase contrast imaging in microscopy [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 689-694.
- [12] Song H Q, Zhang Y W, Ren Y H, et al. Non-local edge enhanced imaging with incoherent thermal light [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116 (17): 174001.
- [13] He S S, Zhou J X, Chen S Z, et al. Wavelength-independent optical fully differential operation based on the spin-orbit interaction of light [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(3): 036105.
- [14] Zhu T F, Zhou Y H, Lou Y J, et al. Plasmonic computing of spatial differentiation [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15391.
- [15] Liu Y F, Yu P P, Hu X Y, et al. Single-pixel spiral phase contrast imaging [J]. *Optics Letters*, 2020, 45 (14): 4028-4031.
- [16] Xu D Y, He S S, Zhou J X, et al. Optical analog computing of two-dimensional spatial differentiation

- based on the Brewster effect [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(24): 6867-6870.
- [17] Zhou Y, Zheng H Y, Kravchenko I I, et al. Flat optics for image differentiation [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(5): 316-323.
- [18] Huo P C, Zhang C, Zhu W Q, et al. Photonic spin-multiplexing metasurface for switchable spiral phase contrast imaging [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(4): 2791-2798.
- [19] Zernike F. Phase contrast, a new method for the microscopic observation of transparent objects [J]. *Physica*, 1942, 9(7): 686-698.
- [20] Eu J K T, Liu C Y C, Lohmann A W. Spatial filters for differentiation [J]. *Optics Communications*, 1973, 9(2): 168-171.
- [21] Görlitz D, Lanzl F. A holographic spatial filter for direction independent differentiation [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1975, 14(S1): 223.
- [22] Feinberg J. Real-time edge enhancement using the photorefractive effect [J]. *Optics Letters*, 1980, 5(8): 330-332.
- [23] Boehme T K, Bracewell R. The Fourier transform and its applications [J]. *The American Mathematical Monthly*, 1966, 73(6): 685-686.
- [24] 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.
- [25] Jesacher A, Fürhapter S, Bernet S, et al. Shadow effects in spiral phase contrast microscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(23): 233902.
- [26] Lauterbach M A, Guillon M, Soltani A, et al. STED microscope with spiral phase contrast [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2050.
- [27] Gozali R, Nguyen T A, Bendau E, et al. Compact OAM microscope for edge enhancement of biomedical and object samples [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(9): 093701.
- [28] Liu S K, Li Y H, Liu S L, et al. Real-time quantum edge enhanced imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35415-35426.
- [29] Wang J K, Zhang W H, Qi Q Q, et al. Gradual edge enhancement in spiral phase contrast imaging with fractional vortex filters [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15826.
- [30] Chen L X, Lei J J, Romero J. Quantum digital spiral imaging [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(3): e153.
- [31] Torner L, Torres J P, Carrasco S. Digital spiral imaging [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 873-881.
- [32] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [33] 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.
- [34] Wei S B, Zhu S W, Yuan X C. Image edge enhancement in optical microscopy with a Bessel-like amplitude modulated spiral phase filter [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(10): 105704.
- [35] Zhou Y, Feng S T, Nie S P, et al. Image edge enhancement using airy spiral phase filter [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25258-25268.
- [36] Zhu X L, Yao H N, Yu J Y, et al. Inverse design of a spatial filter in edge enhanced imaging [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(9): 2542-2545.
- [37] Zhu T F, Lou Y J, Zhou Y H, et al. Generalized spatial differentiation from the spin Hall effect of light and its application in image processing of edge detection [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(3): 034043.
- [38] He S S, Zhou J X, Chen S Z, et al. Spatial differential operation and edge detection based on the geometric spin hall effect of light [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 877-880.
- [39] Kwon H, Sounas D, Cordaro A, et al. Nonlocal metasurfaces for optical signal processing [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(17): 173004.
- [40] Cordaro A, Kwon H, Sounas D, et al. High-index dielectric metasurfaces performing mathematical operations [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(12): 8418-8423.
- [41] Zhou J X, Qian H L, Chen C F, et al. Optical edge detection based on high-efficiency dielectric metasurface [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(23): 11137-11140.
- [42] Zhou J X, Qian H L, Zhao J X, et al. Two-dimensional optical spatial differentiation and high-contrast imaging [J]. *National Science Review*, 2020: nwaal76.
- [43] Xie Z Q, He Y L, Wang P P, et al. Two-dimensional optical edge detection based on Pancharatnam-Berry phase metasurface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(1): 014101.
- [44] Xu D Y, He S S, Zhou J X, et al. Goos-Hänchen effect enabled optical differential operation and image edge detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(21): 211103.
- [45] Zhu T F, Guo C, Huang J Y, et al. Topological optical differentiator [J]. *Nature Communications*,

- 2021, 12(1): 680.
- [46] Bykov D A, Doskolovich L L, Bezus E A, et al. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25084-25092.
- [47] Dong Z W, Si J N, Yu X Y, et al. Optical spatial differentiator based on subwavelength high-contrast gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(18): 181102.
- [48] Yang Y, Liu X Y, Wu Y, et al. Optical edge detection with adjustable resolution based on liquid crystal polarization gratings [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(9): 093501.
- [49] Guo C, Xiao M, Minkov M, et al. Photonic crystal slab Laplace operator for image differentiation [J]. *Optica*, 2018, 5(3): 251-256.
- [50] Roberts A, Gómez D E, Davis T J. Optical image processing with metasurface dark modes[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(9): 1575-1584.
- [51] Wu W H, Jiang W, Yang J, et al. Multilayered analog optical differentiating device: performance analysis on structural parameters[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5270-5273.
- [52] Holyer R J, Peckinpaugh S H. Edge detection applied to satellite imagery of the oceans [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(1): 46-56.
- [53] Pham D L, Xu C, Prince J L. Current methods in medical image segmentation [J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2000, 2: 315-337.
- [54] Zhu T F, Huang J Y, Ruan Z C. Optical phase mining by adjustable spatial differentiator [J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(1): 016001.
- [55] Pancharatnam S. Generalized theory of interference, and its applications [J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A*, 1956, 44(5): 247-262.
- [56] Berry M V. The adiabatic phase and pancharatnam's phase for polarized light [J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, 34(11): 1401-1407.
- [57] Zhou J X, Liu S K, Qian H L, et al. Metasurface enabled quantum edge detection [J]. *Science Advances*, 2020, 6(51): eabc4385.
- [58] Liu X F, Yao X R, Lan R M, et al. Edge detection based on gradient ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33802-33811.
- [59] Zhou C, Wang G C, Huang H Y, et al. Edge detection based on joint iteration ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 27295-27307.
- [60] Ren H D, Zhao S M, Gruska J. Edge detection based on single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5501-5511.
- [61] Wang L, Zou L, Zhao S M. Edge detection based on subpixel-speckle-shifting ghost imaging [J]. *Optics Communications*, 2018, 407(15): 181-185.
- [62] Gibson G M, Johnson S D, Padgett M J. Single-pixel imaging 12 years on: a review [J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 28190-28208.
- [63] Jack B, Leach J, Romero J, et al. Holographic ghost imaging and the violation of a Bell inequality [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(8): 083602.
- [64] Aspden R S, Morris P A, He R Q, et al. Heralded phase-contrast imaging using an orbital angular momentum phase-filter [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055204.
- [65] Moreau P A, Toninelli E, Gregory T, et al. Imaging Bell-type nonlocal behavior [J]. *Science Advances*, 2019, 5(7): eaaw2563.
- [66] Shi B S, Tomita A. Generation of a pulsed polarization entangled photon pair using a Sagnac interferometer [J]. *Physical Review A*, 2004, 69: 013803.
- [67] Li Y, Zhou Z Y, Ding D S, et al. CW-pumped telecom band polarization entangled photon pair generation in a Sagnac interferometer [J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28792-28800.
- [68] Qiu X D, Li F S, Zhang W H, et al. Spiral phase contrast imaging in nonlinear optics: seeing phase objects using invisible illumination [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 208-212.
- [69] Zhou Z Y, Li Y, Ding D S, et al. Generation of light with controllable spatial patterns via the sum frequency in quasi-phase matching crystals [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5650.
- [70] Li Y, Zhou Z Y, Ding D S, et al. Sum frequency generation with two orbital angular momentum carrying laser beams [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(3): 407-411.
- [71] Zhou Z Y, Li Y, Ding D S, et al. Highly efficient second harmonic generation of a light carrying orbital angular momentum in an external cavity [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23673-23678.
- [72] Zhou Z Y, Liu S L, Li Y, et al. Orbital angular momentum-entanglement frequency transducer [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(10): 103601.
- [73] Liu S K, Yang C, Liu S L, et al. Up-conversion imaging processing with field-of-view and edge enhancement [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(4): 044013.
- [74] Demur R, Garioud R, Grisard A, et al. Near-infrared to visible upconversion imaging using a

- broadband pump laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13252-13263.
- [75] Maestre H, Torregrosa A J, Capmany J. IR image upconversion under dual-wavelength laser illumination[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(6): 1-8.
- [76] Maestre H, Torregrosa A J, Fernández-Pousa C R, et al. IR-to-visible image upconverter under nonlinear crystal thermal gradient operation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1133-1144.
- [77] Junaid S, Tomko J, Semtsiv M P, et al. Mid-infrared upconversion based hyperspectral imaging [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2203-2211.
- [78] Fujiyoshi H, Hirakawa T, Yamashita T. Deep learning-based image recognition for autonomous driving[J]. *IATSS Research*, 2019, 43(4): 244-252.
- [79] Lu S W, Wang Z Q, Shen J. Neuro-fuzzy synergism to the intelligent system for edge detection and enhancement [J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(10): 2395-2409.
- [80] Kim J, Jun H. Implementation of image processing and augmented reality programs for smart mobile device [C] // *Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology*, August 22-24, 2011, Harbin. New York: IEEE Press, 2011: 1070-1073.