

傅里叶单像素成像技术与应用

张子邦, 陆天傲, 彭军政, 钟金钢

(暨南大学 光电工程系, 广东 广州 510632)

摘要: 非可见光成像是光学成像领域中的难题之一。单像素成像作为一种新型的计算成像技术, 利用空间光调制技术, 可实现只使用一个无空间分辨能力的单像素探测器获取物体的空间信息。因此单像素成像是解决传统成像在非可见光波段成像难题的潜在解决方案之一。近年, 傅里叶单像素成像技术被证明是一种可以兼得高成像质量和高成像效率的单像素成像技术。自 2015 年被提出至今, 傅里叶单像素成像已经从二维成像推广到三维成像、从灰度成像推广到彩色成像、从静态成像推广到动态成像、从单模态成像推广到多模态成像、从宏观成像推广到显微成像, 发展出一系列的成像技术。对傅里叶单像素成像技术的基本原理、与之相关的成像技术和应用进行了综述, 并讨论了现存的一些关键问题以及今后可能的研究方向。

关键词: 成像系统; 图像获取; 计算成像; 单像素成像

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0603002

Fourier single-pixel imaging techniques and applications

Zhang Zibang, Lu Tian'ao, Peng Junzheng, Zhong Jingang

(Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Imaging at non-visible wavebands is one of the challenges in optical imaging. As a novel computational imaging technique, single-pixel imaging based on spatial light modulation is able to obtain spatial information of object via a non-spatially-resolving detector. Thus, single-pixel imaging technique is a potential approach to the challenge of imaging at non-visible wavebands. In recent years, Fourier single-pixel imaging is demonstrated to be able to offer high-quality and high-efficiency image acquisition. Since proposed in 2015, Fourier single-pixel imaging technique has been extended a series of techniques ranging from two-dimensional imaging to three-dimensional imaging, from mono-chromatic imaging to true-color imaging, from static imaging to dynamic imaging, from single-modality imaging to multi-modality imaging, and from photography to microscopy. The principle and related applications of Fourier single-pixel imaging were reviewed. Some challenging problems and prospects of the technique were also discussed.

Key words: imaging system; image acquisition; computational imaging; single-pixel imaging

收稿日期: 2019-01-05; 修订日期: 2019-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(61875074, 61475064); 暨南大学科研培育与创新基金(11618307)

作者简介: 张子邦(1988-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事单像素成像与显微计算成像等方面的研究。

Email: charles.cheung.zzb@gmail.com

通讯作者: 钟金钢(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学工程与生物医学光学等方面的研究。Email: tzjg@jnu.edu.cn

0 引言

图像是人类认识世界的主要途径^[1], 成像技术是获取图像的主要手段。传统成像技术, 目前广泛采用以硅为光敏材料的多像素阵列型探测器 (如 CCD 或 CMOS) 作为图像传感器。硅的光谱响应范围约为 400~800 nm, 即可见光及其附近的波段。因此, CCD 和 CMOS 难以在非可见光波段进行图像获取。对于具有重要应用价值的非可见光波段 (例如, 远红外、深紫外、太赫兹、X 光等), 目前还没有办法制造出具有高空间采样率且低成本的阵列探测器。因此, 非可见光成像是光学成像领域中的难题之一。然而, 制造能工作在非可见光波段的单像素探测器要比阵列探测器容易且成本低得多。若能实现使用单像素探测器代替阵列探测器进行成像, 那么非可见光成像的困难就有望得到解决。与阵列探测器相比, 单像素探测器还具有更高的量子效率、更低的暗噪声和更短的响应时间等优点。例如, 在医学成像和远距离 3D 成像等应用中, 由于物体或传播介质对光具有强散射或强吸收作用, 阵列探测器收集到的光的强度是非常弱的, 单像素探测器在这些场合就具有显著的优势了。因此, 在最近的十余年间, 一种仅使用单个探测器作为成像元件的“单像素成像技术”, 成为了研究热点之一。

事实上, 单像素成像技术并不是新事物。最早的单像素成像技术可追溯到 1884 年提出的 Flying-spot 相机^[2]。该相机工作原理是基于空间点扫描的单像素成像技术——辅以机械运动的单像素探测器在空间域进行平移和探测, 测量物体在不同空间位置的光强值, 而测量值就是重建图像在对应位置的灰度值。另外, 人们所熟知的共焦显微镜、光学相干层析术等都是广义上的基于空间点扫描方法的单像素成像技术信噪比普通较低。然而, 基于空间点扫描方法的单像素成像技术信噪比普通较低, 除非借助其他手段来改善测量的信噪比, 否则不但由于探测到的信号弱导致成像质量不佳, 还因机械扫描导致图像获取时间长。另外, 基于空间点扫描方法的单像素成像所得的图像, 其空间分辨率还与扫描间隔有关, 扫描间隔越小, 空间分辨率越高, 扫描时间越长。

在近十余年间成为研究热点的单像素成像技术是指基于空间光调制的单像素成像。基于空间光

调制的单像素成像技术作为一种计算成像技术, 通过空间光调制技术对空间信息进行编码, 再通过单像素探测器对编码后所得的光信号进行采集, 最后通过计算对空间信息进行解码, 恢复出物体图像。目前, 基于空间光调制的单像素成像技术已在可见光成像^[3]、多光谱成像^[4-7]、超光谱成像^[8-9]、红外成像^[10]、太赫兹成像^[11-13]、气体成像^[14]、实时录影^[10,15-19]、图像后处理^[20-22]、显微成像^[8,15,23]、三维成像^[16,24-29]、偏振成像^[30-32]、多模态成像^[7]、透过散射介质成像^[33-34]、X 光散射层析成像^[35]、光声成像^[36-37]、全息成像^[38]、相位成像^[39]、眼底成像^[40]、流式细胞仪^[41]、超快成像^[42-43]、远距离成像^[44-45]等中得到应用。基于空间光调制的单像素成像有两种光路设计。如图 1(a)所示, 光源产生均匀的照明光场经空间光调制器调制后, 通过成像透镜成像在物体面上, 单像素探测器收集物体与结构光场照明下所得的光场强度 (可以是反射光、透射光、或激发荧光), 这种调制方式称为前调制方式, 又称为结构照明 (Structured illumination); 如图 1(b)所示, 物体在传统照明条件下空间光调制器对物体的像进行调制, 所得的光场由单像素探测器探测, 这种调制方式称为后调制方式, 又称为结构探测 (Structured detection)。

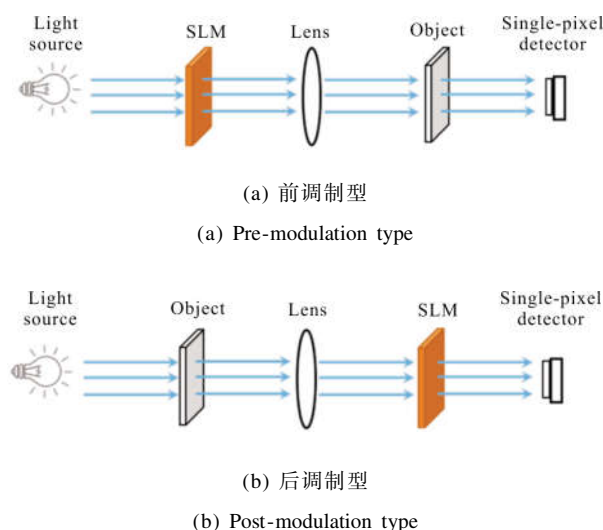


图 1 基于空间光调制的单像素成像的光路设计

Fig.1 Light path designs of single-pixel imaging based on spatial light modulation

前调制型和后调制型的原理都是利用空间光调制技术产生随时间变化的图案 $P(x, y)$, 并对物体图像 $O(x, y)$ 进行调制, 再使用单像素探测器测量光

场的强度,利用调制图案与单像素探测器探测到的光强值的相关性,通过数值计算重建出物体图像。单像素

探测器的测量值可表示为 $D=k \iint |O(x,y) \cdot P(x,y)|^2 dx dy$,

即物体图像 $O(x,y)$ 与空间光调制图案 $P(x,y)$ 的内积值, k 为单像素探测器的光电响应系数,该值越大表示物体图像与空间光调制图案越相似,反之亦然。

成像效率是通过成像时间来量化的。成像时间越短,则成像的效率越高。单像素成像的成像时间是数据采集时间与图像重建时间之和。对于不同的单像素成像技术,数据采集时间的计算公式是相同的,即空间光调制图案数目与空间光调制器调制速率之比。表 1 列出了常见的空间光调制器的工作原理及性能参数。

表 1 常用空间光调制器对比

Tab.1 Comparison among typical spatial light modulators

Modulator	Working mode	Refreshing rate	Resolution
Digital micro-mirror device	Reflectance	22 000 binary patterns/s	1 024 pixel×768 pixel
Liquid crystal on silicon	Reflectance/transmittance	1 208-bit patterns/s	1 920 pixel×1 080 pixel
LED matrix	Active illumination	500 000 binary patterns/s	32 pixel×32 pixel

最早的基于空间光调制的单像素成像技术是受量子鬼成像启发而来,称为计算鬼成像技术。这种技术使用随机图案作为空间光调制图案。利用统计学原理,通过采用随机图案对照明光场或被探测光场进行强度调制,并对所用的随机图案和对应的单像素探测值求相关运算,即可重建物体图像。由于相关运算的计算复杂度相当低,因此图像重建时间非常短。但值得一提的是,这种使用随机图案的作为调制图案的单像素成像技术,若要恢复出质量可观的物体图像,则所需的测量次数远多于重建图像的像素个数(即需要过采样才能恢复出质量可观的图像)。当测量次数较少时,重建的图像质量是相当低的。因此,计算鬼成像的数据采集时间相当的长。

为减少数据采集时间,Katz 等人在 2009 年提出了基于压缩感知(Compressed sensing)^[46]的单像素成

像,该技术同样是采样随机图案作为空间光调制图案,其技术核心是利用压缩感知算法^[47]重建图像。压缩感知利用自然图像在正交变换域中的稀疏性,可以从欠采样的采样数据中重建物体图像,因此相比计算鬼成像有效地降低了数据采集时间。然而,压缩感知算法往往需要花费几分钟甚至几小时的运算时间来重建图像(具体的运算时间因重建的图像大小、测量次数和重建算法而异)。另外,通过压缩感知重建的物体图像,质量取决于图像在变换域中的稀疏性。若物体图像在变换域中越稀疏,则重建质量越高,反之亦然。可见,基于压缩感知和随机图案调制的单像素成像技术是通过牺牲成像效率来换取成像质量。

空间光调制图案的选择,对单像素成像的质量和效率影响甚大。单像素成像除了可以使用随机图案进行空间光调制以外,还可以使用确定性的正交变换基底图案进行空间光调制。这类使用确定性的正交变换基底图案进行空间光调制的单像素成像方法(包括哈达玛单像素成像^[10,14-16,19,27,40,48-54]、离散余弦单像素成像^[55]、小波变换单像素成像^[56]和傅里叶单像素成像^[7,18,29,57,58]等)被称为基扫描单像素成像(Basis scan single-pixel imaging)。通过采用整套完备的正交变换基底图案进行空间光调制,基扫描单像素成像可以无失真地重建物体图像,这是基扫描单像素成像与计算鬼成像和基于压缩感知的单像素成像相比的显著优势之一。另外,基扫描单像素成像也可以利用自然图像在变换域的稀疏性,通过仅获取变换域中较大的系数,以欠采样的方式重建出高质量的物体图像,且图像重建仅仅是一次简单的二维逆变换,运算时间可以忽略不计。

近年,傅里叶单像素成像技术被证明是一种可以兼得高成像质量和高成像效率的基扫描单像素成像技术^[59],且傅里叶单像素成像从二维成像到三维成像,从单色成像到彩色成像,从静态成像到动态成像,从宏观成像到显微成像,从单模态成像到多模态成像,已经发展出一系列的成像技术。文中将对傅里叶单像素成像的技术及应用进行系统总结。

1 傅里叶单像素成像技术

1.1 二维傅里叶单像素成像

图像是一种二维空间信号,常采用空间域的表

达,即图像是由空间域的基函数——脉冲函数组成

的。空间域的脉冲函数就是像素,像素的值称为灰度。实际上,图像还可以在其它正交变换空间进行等价的表达,例如,傅里叶变换域、哈达玛变换域、离散余弦变换域、小波变换域等正交变换域。二维傅里叶单像素成像就是基于图像在傅里叶变换域中的表达。

如图 2 所示,任意一幅图像都是一系列不同空间频率和不同初相位的条纹图案加权叠加的结果^[60]。在图像尺寸(像素数)相同的前提下,不同的图像所分解得到的基底图案是完全相同的,不同的只是不同基底图案所对应的权重值。由于变换域的基底图案是已知的,因此,重建不同的图像只需要获取不同基底图案所对应的权重值即可。若利用空间光调制技术,在空间光调制器上生成与基底图案一致的图案对照明光场进行调制,则单像素探测器所测量到的值就是物体图像与该基底图案的内积值,内积值就是该基底图案对应的权重值。

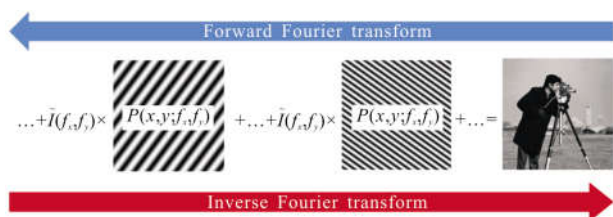


图 2 傅里叶正变换和逆变换分别可实现图像的分解和合成
Fig.2 Decomposition and composition of an image can be achieved by forward Fourier transform and inverse Fourier transform, respectively

傅里叶单像素成像是基于傅里叶分析理论,利用傅里叶基底图案作为空间光调制图案,对照明光场或待探测光场进行调制,使用单像素探测器作为信号探测器获取被探测光场的光强值,通过光强值计算出物体图像的傅里叶变换谱,最后通过逆傅里叶变换以重建物体图像的技术。

特别地,如图 3 所示,对于傅里叶变换域,自然图像的稀疏性是指其傅里叶变换的大部分能量高度集中在傅里叶变换域的原点及其附近(即低频部分)。这种稀疏性在空间域中表现为灰度值的变化具有连续性和慢变性。利用上述稀疏性,可以只获取图像在傅里叶变换域中的低频部分的系数,从而在不显著牺牲重建图像质量的前提下,减少测量次数以提升成像效率。

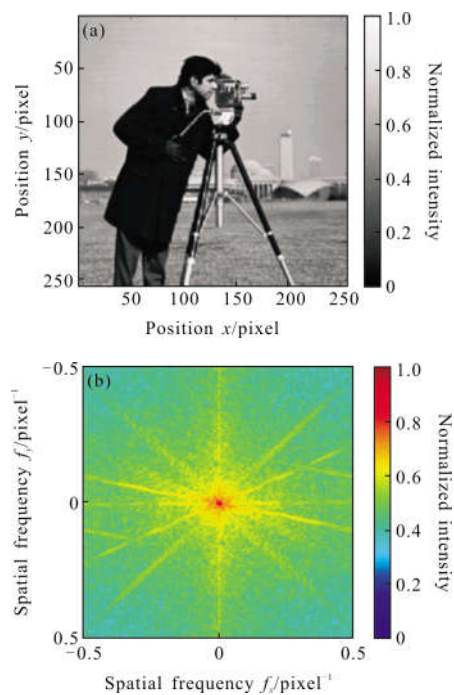


图 3 自然图像及其傅里叶变换谱;(a)分辨率为 256×256 pixel 的自然图像;(b)傅里叶变换幅度谱

Fig.3 Natural image and it's modulus of Fourier spectrum;
(a) natural image with the resolution of 256×256 pixel; (b) modulus of Fourier spectrum

通过空间光调制技术获取物体图像的傅里叶系数的方法如图 4 所示。傅里叶单像素成像采用 N 步相移的方法来实现傅里叶系数的获取。图 4 给出当 $N=4$ 时的情况。每一个傅里叶系数对应唯一一个空间频率 (f_x, f_y) ,而要获取对应该坐标空间频率的傅里叶系数,可采用 N 步相移法。 N 步相移法使用 N 张频率同为 (f_x, f_y) ,但初相位 ϕ 分别为 $2k\pi/N (k=0, 1, \dots, N-1)$ 的傅里叶基底图案作为空间光调制图案。傅里叶基底图案是二维狄拉克函数的二维逆傅里叶变换(取实部)的结果,因此,傅里叶基底图案既可以通过基于空间域表达的方法产生,也可以通过基于傅里叶变换域表达的方法产生。其中,基于空间域表达的方法使用三角函数 $P(x, y; f_x, f_y, \phi) = a + b \cdot \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \phi)$ 直接生成,其中 a 是平均强度, b 是对比度, x, y 是目标物体所在平面的直角坐标, f_x 和 f_y 分别是对应 x, y 方向的空间频率, ϕ 是初相位。也可以通过傅里叶域法,即公式 $\text{real}(F^{-1}\{\delta(f_x, f_y)\})$ 产生,其中 δ 表示狄拉克(冲激)函数, $F^{-1}\{\}$ 表示傅里叶逆变换, $\text{real}()$ 表示取实部。虽然傅里叶变换谱中的系数为复

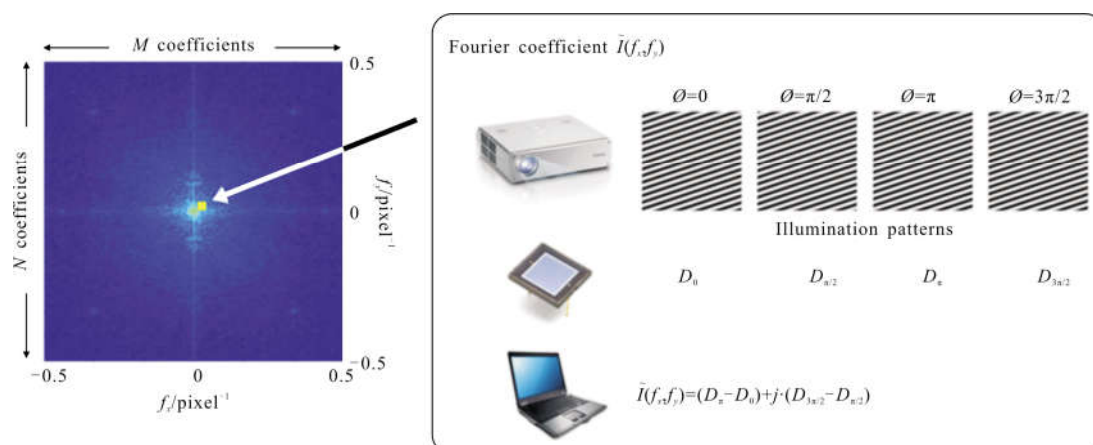


图 4 四步相移法获取傅里叶系数示意图

Fig.4 Schematic diagram of Fourier coefficients acquisition using four-step phase-shifting strategy

数的形式,但本质上是由实部和虚部两个实数组成。因此,傅里叶单像素成像可以通过使用不同的傅里叶基底图案分别获取傅里叶系数的实部和虚部,再合成一个复值的傅里叶系数来实现傅里叶谱获取^[57]。 N 步相移的空间光调制图案记为 $P_\phi(x, y; f_x, f_y) = a + b \cdot \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \phi)$, 对应的单像素测量值记为 $D_\phi(f_x, f_y) = D_n + \beta \iint_S R(x, y) P_\phi(x, y; f_x, f_y) dx dy$, 其中 D_n 是背景照明在探测器位置引起的光响应值, β 是一个与单像素探测器的光电响应系数、探测器与物体的空间关系有关的因子, $R(x, y)$ 是物体表面反射率分布函数。此处给出相移量 N 为 $N=2$ 、 $N=3$ 和 $N=4$ 三种情况的傅里叶系数计算公式, 其中记图像的 N 步相移傅里叶谱为 \tilde{I}_N (为简明起见, 公式省略了测量值的空间频率坐标 (f_x, f_y)):

$$\tilde{I}_2 = [D_0 - D_{\pi/2}(0, 0)] + j \cdot [D_{\pi/2} - D_{\pi/2}(0, 0)] \quad (1)$$

$$\tilde{I}_3 = (2D_0 - D_{2\pi/3} - D_{4\pi/3}) + j \cdot (D_{2\pi/3} - D_{4\pi/3}) \quad (2)$$

$$\tilde{I}_4 = (D_0 - D_\pi) + j \cdot (D_{\pi/2} - D_{3\pi/2}) \quad (3)$$

其中公式(1)的 $D_{\pi/2}(0, 0)$ 为投影 $P_{\pi/2}(x, y; f_x=0, f_y=0)$ 时, 单像素探测器响应值。当 $N=4$ 时(即四步相移), 傅里叶变换系数的获取是一种典型的差分测量的方法, 在获取傅里叶系数的实部和虚部时分别投影两张互为反图像的傅里叶基底图案, 再将所得的单像素测量值相减, 能有效地抑制因背景光照或电路中的噪声, 从而利于提高重建图像的质量。另外, 当

$N=3$ 时, 傅里叶变换系数的获取也是一种差分测量的方法, 但由于计算公式上没有四步相移的公式对称, 虽然具有一定的抗噪声能力, 但逊于四步相移。通过遍历傅里叶变换谱中的所有系数, 可以完成对整个物体图像傅里叶变换谱的采集。对所获得的傅里叶变换谱进行二维的逆傅里叶变换, 再取变换结果的模, 即可重建出物体图像。

值得注意的是, 由于自然图像是实值的, 因此其傅里叶变换谱具有共轭对称性。然而, 对于离散化的傅里叶变换谱, 其共轭对称性因频谱的行数和列数是奇数或偶数而稍有差异。图 5(a)~(d) 分别给出了 9 行 9 列, 9 行 10 列, 10 行 9 列和 10 行 10 列的离散化傅里叶谱的共轭对称性示意图。图中标志为 C_i 和 C_i^* 的为复值的傅里叶系数且互为共轭关系, 而标志为 R_i 的为实值系数。容易看出, 实值系数的位置均为共轭对称中心。利用傅里叶谱的共轭对称性, 只需要获取一半的复值傅里叶系数即可, 另一半的系数可以通过共轭性质来补全。若采用四步相移法的傅里叶单像素成像技术重建一幅 $M \times N$ 像素的图像, 则满采样所需的测量次数为 $2 \times M \times N$ 次。由于测量次数是图像像素数的两倍, 由此也可证明四步相移是一种典型的差分测量方法。

图 6 给出了二维傅里叶单像素成像的实验装置图。数字投影仪用作空间光调制器; 两个光电二极管用作单像素探测器。为证明傅里叶单像素成像在弱光条件下也能重建出高质量的图像, 在探测器 1 的

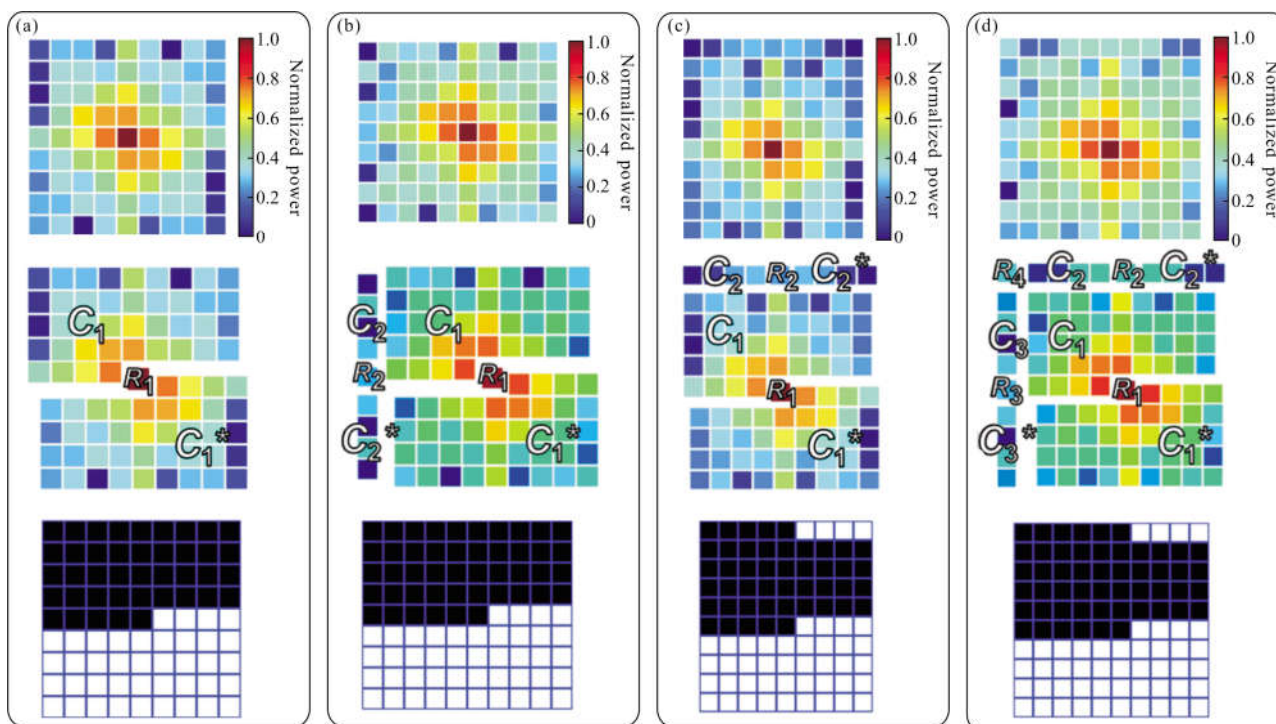


图 5 共轭对称示意图;(a)图像行列均为奇数的情况;(b)图像行数为奇数,列数为偶数的情况;(c)图像行数为偶数,列数为奇数的情况;(d)图像行列均为偶数的情况;第一行为图像的傅里叶幅度谱,第二行为傅里叶变换系数的复数和实数分布情况,第三行黑色区域表示需要测量的区域,其中黑色区域表示需要测量,白色区域表示可根据对称性推导出而免测量的区域

Fig.5 Schematic diagram of conjugate symmetry; (a) image with odd rows and odd columns; (b) image with odd rows and even columns; (c) image with even rows and odd columns; (d) image with even rows and even columns; The first row is for the Fourier spectra. The second shows distribution of complex-valued and real-valued Fourier coefficients. Pixels in black in the third row are needed to be measured and pixels in white are not needed to be measured as they can be derived by the symmetry

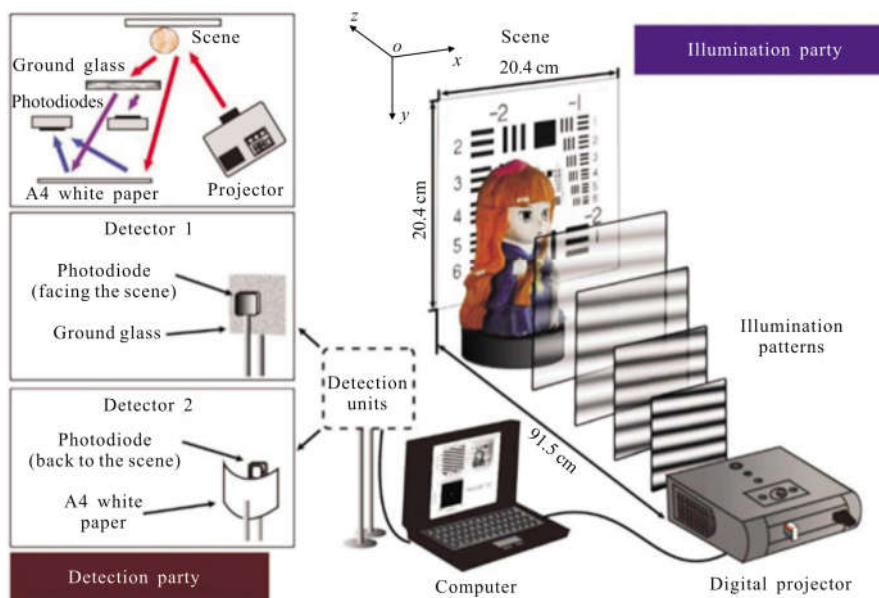


图 6 二维傅里叶单像素成像实验装置示意图^[57]

Fig.6 Experimental set-up of two-dimension Fourier single-pixel imaging^[57]

光敏面前放置一块毛玻璃,并令探测器 2 的光敏面背向目标物体,同时在光敏面前放一张白色 A4 纸作为漫反射体。探测器 2 收集的光可以被视为仅间接光。图 7 给出了两个探测器在不同傅里叶域采样率下对应的重建结果。图 7 所示,二维傅里叶单像素成

像能够在弱光探测的条件下,且采样率仅为 10% 的时候重建出清晰的物体图像。这证明二维傅里叶单像素成像是一种兼得高成像质量和高成像效率的单像素成像技术。

然而,采用数字投影仪作为空间光调制器,仅能

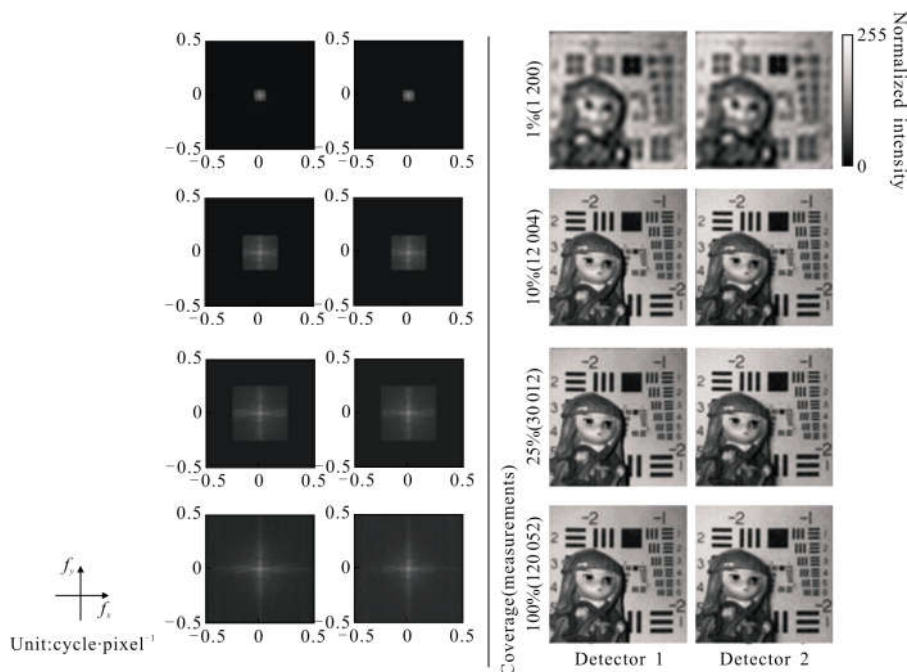


图 7 二维傅里叶单像素成像实验结果^[57]

Fig.7 Experimental results of two-dimension Fourier single-pixel imaging^[57]

实现最多每秒 60 张图案的投影,为进一步提升二维傅里叶单像素成像效率,可采用数字微镜器件(Digital micro-mirror device,DMD)作为高速空间光调制器。尽管最先进的 DMD 产生二值图案的速率达 22 000 Hz,但是在产生多灰度级的图案时速度会大幅下降。例如,DMD 产生 256 灰度级图案的速率仅为 250 Hz。若能产生近似多灰度图案的二值化图案,则可以利用 DMD 的高速二值图案调制能力,实现

快速的单像素成像。快速二维傅里叶成像技术^[18]利用空间平均效应,通过对傅里叶基底图案进行上采样和基于抖动的二值化,产生近似多灰度级的傅里叶基底图案进行投影,以实现高速、高质量的单像素成像技术。

如图 8 所示,二值化的傅里叶基底图案按以下三个步骤生成:首先,按照前文所述的傅里叶域法生成多灰度级的分辨率为 $M \times N$ 像素的离散傅里叶基

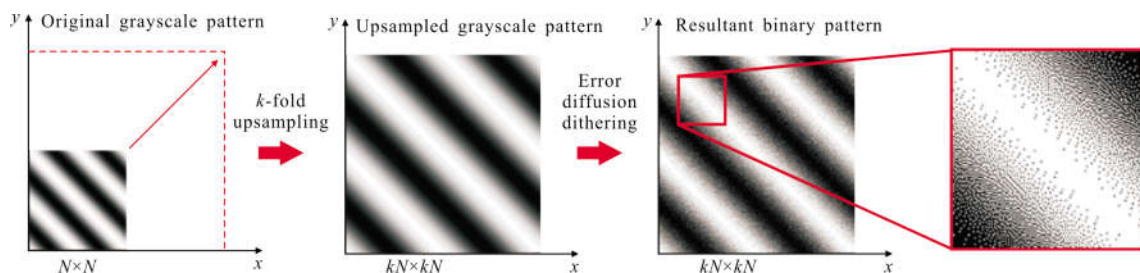


图 8 快速傅里叶单像素成像二值傅里叶基底图案生成方法示意图^[18]

Fig.8 Schematic diagram of binary Fourier base pattern generation in fast Fourier single-pixel imaging^[18]

底图案;然后,对多灰度级的傅里叶基底图案进行插值(上采样),使像素数提高到 $kM \times kN$,其中 k 为插值倍数($k > 1$);最后,对插值后的傅里叶基底图案施行基于误差扩散的 Floyd-Steinberg 抖动算法^[61],得到像素数为 $kM \times kN$ 的二值化离散傅里叶基底图案。基于误差扩散的图像二值化算法的思想是把阈值法二值

化过程中对某个像素引起的量化误差扩散到该像素点附近的其它像素点上,以避免由该像素完全承担这个误差。

图 9 给出了 DMD 投影速率分别为 250、2 000、20 000 Hz 的重建图像,其中参数 $k=2$,重建的图像大小为 256×256 pixel。对应的数据获取时间为 392、

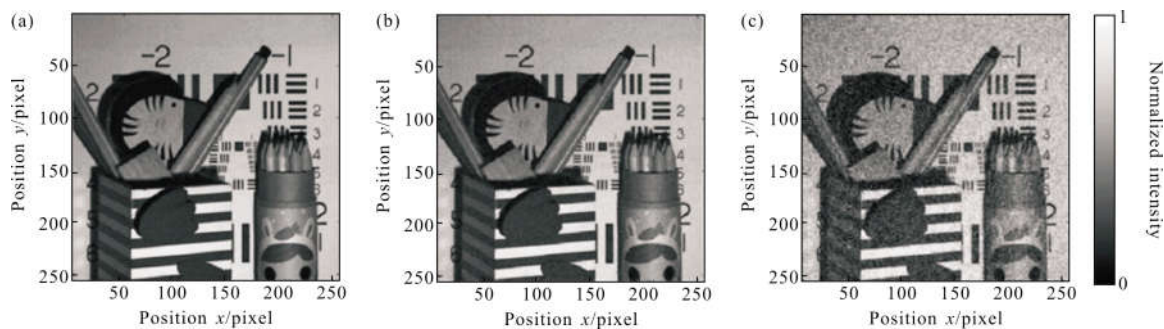


图 9 快速傅里叶单像素成像静态成像结果^[18],重建图像的分辨率为 256×256 pixel ($k=2$);(a)DMD 速率为 250 Hz;(b) DMD 速率为 2 000 Hz;(c)DMD 速率为 20 000 Hz

Fig.9 Static imaging results of fast Fourier single-pixel imaging^[18]: (a) DMD rate=250 Hz; (b) DMD rate=2 000 Hz; (c) DMD rate=20 000 Hz. The resolution of reconstructed image is 256×256 pixel and $k=2$

49、4.9 s。

另外,快速傅里叶单像素成像还能实现动态成像。图 10 给出了通过快速傅里叶单像素成像技术获取的一段 17 s 的视频中的 8 张物体图像。其中,

DMD 的投影速率为 20 000 Hz,物体图像分辨率为 256×256 pixel,参数 $k=2$,视频帧率为 10,每张物体图像的采样率约 2%(通过三步相移获取 666 个傅里叶系数)。

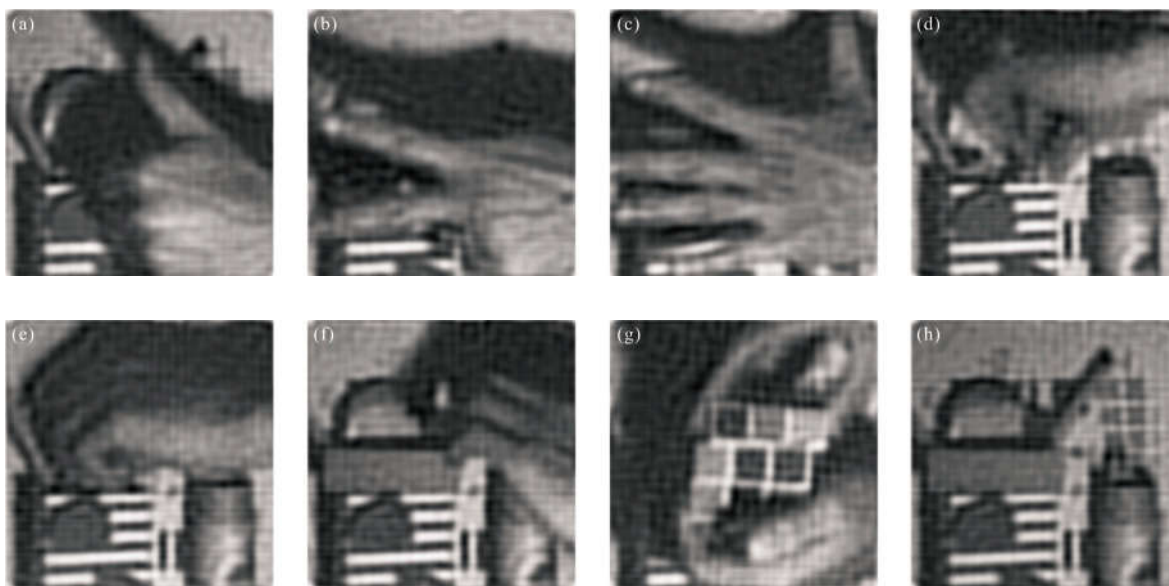


图 10 快速傅里叶单像素成像动态成像结果^[18],重建图像的分辨率为 256×256 pixel ($k=2$),帧速率约为 10 帧/s

Fig.10 Dynamic imaging results of fast Fourier single-pixel imaging^[18]. The resolution of reconstructed images is 256×256 pixel ($k=2$) and the frame rate is ~ 10 frame/s

1.2 三维傅里叶单像素成像

三维成像能获取物体的深度信息，是物体三维立体重建、三维立体测量、三维立体显示的核心技术之一。三维傅里叶单像素成像^[29]是首个实现只使用一个单像素探测器作为探测元件的三维单像素成像技术。

前文已经证明了二维傅里叶单像素成像技术能够实现高质量和高采样效率的单像素成像。因此，要实现高质量和高采样效率的三维单像素成像，可以将三维成像问题转化成为二维成像问题。又由于三维成像问题本质上是物体的深度信息的获取，而二维成像问题本质上是物体的空间信息获取，因此，将三维成像问题转化成二维成像问题其核心在于如何将物体的深度信息调制到光强信息之中。在传统成像中，条纹投影轮廓术^[62]是一种一种能够将深度信息调制到光强信息中的且简单和具有高精度的三维成像技术。这种技术将目标物体、投影系统和探测系统构成三角关系，通过投影系统将条纹投影到目标物体上，并用探测系统记录因物体形貌而发生变形的条纹图案，最后根据条纹的形变量与物体的表面深度的关系来重建物体的形貌。基于结构光调制的单像素成像满足亥姆霍兹互易性原理^[63]，即由照明系统决定所得图像的视场，由探测系统决定所得图像的光影效果，所以可以通过在探测光路对待探测的

光场进行调制，实现条纹投影轮廓术。由于条纹投影仪轮廓术只需要变形条纹图像就能够把物体的深度信息解调出来，又由于变形条纹跟傅里叶基底图案(正弦条纹图案)的相似度非常高，因此其傅里叶变换谱的能量集中在以条纹的载频为中心的一级频谱附近。利用变形条纹图案其能量在傅里叶空间的稀疏性，可以通过仅采集一级频谱的傅里叶系数来实现三维成像，从而减少测量次数，提高成像效率。

三维傅里叶单像素成像的实验装置如图 11(a)所示，和二维傅里叶单像素成像的实验装置的不同之处在于，投影系统和探测系统的光轴必须有一定的交角，且单像素探测器前放置了一个光栅和两个透镜。其中透镜 1 是必须的。透镜 1 使目标物体和光栅片成共轭关系。透镜 2 是非必须的，使用该透镜可使单像素探测器收集到更多经光栅片透射的直透光。图 11(b)是用于条纹投影三维轮廓术的经典光路图。图 11(a)与图 11(b)满足亥姆霍兹互易性，即由图 11(a)重建的图像与由图 11(b)拍摄到的图像是完全一致的。根据图 11(a)单像素探测器采集的信号所重建的目标物体的二维图像，其视角由虚拟相机(即投影仪)的位置决定。由于光栅放置在目标物体的共轭位置，故光栅的像将被虚拟地投影到物体表面形成条纹图像。由于投影光路和拍摄光路的离轴设置，从空间光调制器的视角观察，目标物体表面的条纹

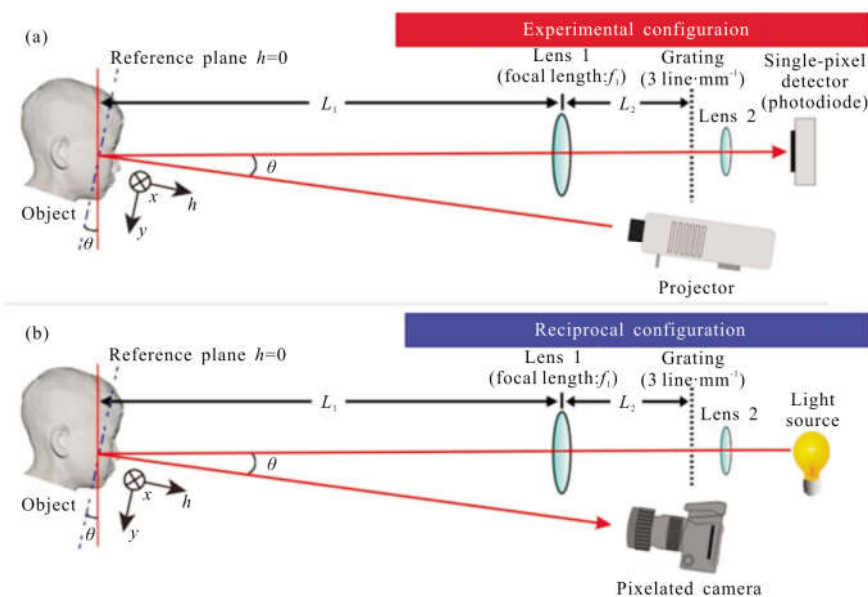


图 11 三维傅里叶单像素成像实验装置图^[29]; (a)实际的实验装置图; (b)与(a)倒易的等效实验装置图

Fig.11 Experimental setup of three-dimension Fourier single-pixel imaging^[29]; (a) actual configuration; (b) reciprocal configuration

图像会发生几何变形,该形变满足三角几何关系。以标准条纹为参考,变形条纹的形变量与物体表面与参考平面的高度差成正比关系。而变形条纹的形变量可通过变形条纹的调制相位求出。变形条纹图像的灰度分布可表示为:

$$I(x,y)=A(x,y)+B(x,y)\cos[2\pi f_0 y+\Delta\varphi(x,y)] \quad (4)$$

式中: A 为变形条纹图的平均灰度; B 为对比度; f_0 为由光栅频率决定的载频; $\Delta\varphi(x,y)$ 为变形条纹的调制相位函数,其含有物体表面深度分布信息; x,y 为参考平面的笛卡尔坐标。目标物体是如图 12(a)所示的一个小男孩头部白色石膏像。图 12(b)是通过 20 740 次测量获得的目标物体傅里叶谱中的一级频谱部

分。使用傅里叶条纹相位提取算法可进一步重建出如图 12(c)所示的条纹调制相位分布,并最终重建出如图 12(d)所示的小男孩头部的三维形貌。重建的三维图像的图像分辨率为 599×599 pixel,而测量次数仅为像素数的 5.78%,可见本方法具有非常高的数据采集效率。在三维重建图中可见,小男孩头部石膏像的面部细节、眼睛和嘴唇清晰可辨,说明该方法所需测量次数少且重建精度高。

三维傅里叶单像素成像具有高数据采集效率的特点,能通过远小于图像像素数的测量次数,重建出亚毫米级深度精度的物体三维表面轮廓。三维傅里叶单像素成像可进一步推广为高速、高精度、高效率

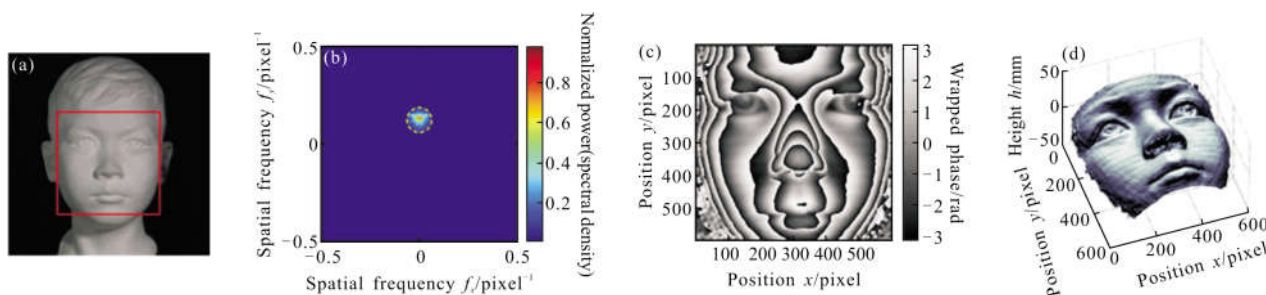


图 12 三维傅里叶单像素成像实验结果^[20]; (a) 目标物体实物图; (b) 通过投影 20 740 张傅里叶基底图案(即采样率为 5.78%)获得的傅里叶谱的一级频谱; (c) 使用傅里叶变换相位解调算法从图(b)解调得到的包裹相位分布; (d) 从图(c)重建得到的高度分布
Fig.12 Experimental result of three-dimension Fourier single-pixel imaging^[20]; (a) photography of target object; (b) Fourier spectrum with first-order component obtained from 20 740 projection patterns(sampling ratio=5.78%); (c) wrapped phase map demodulated from (b) using the Fourier transform phase demodulation algorithm; (d) reconstructed height distribution from (c)

的非可见光的三维成像。

1.3 彩色傅里叶单像素成像

彩色成像在现实生活中有着重要意义,但单像素探测器不但不具有空间分辨能力,而且也不具有光谱分辨能力。因此,要实现利用单像素探测器进行彩色图像获取是一个挑战。在传统成像中,图像传感器虽然不具有光谱分辨能力的,但通过在图像传感器上安装与传感器等尺寸的拜耳滤镜,使图像传感器对物体图像的红、绿、蓝分量进行空间上等间隔的采样,再对所获得的图像进行插值和色彩恢复,就能实现彩色成像。

受此启发,彩色傅里叶单像素成像^[7]利用基于主动调制的单像素成像所满足的亥姆霍兹互易性,使用拜耳滤镜对照明光场进行调制,等效地实现了在传统彩色成像中拜耳滤镜对被探测光场进行调制的效果。为实现对照明光场的调制,用于彩色单像素

成像的拜耳滤镜其小滤镜的尺寸与空间光调制器的像素大小一致,且每个小滤镜与空间光调制器的像素对准。由于拜耳滤镜对光场是产生乘性作用(如图 13 所示),空间光调制器在白光光源的照明下,即可产生经拜耳滤镜编码的彩色照明光场。

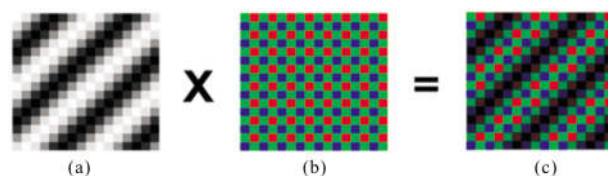


图 13 彩色傅里叶单像素成像中彩色傅里叶基底图案生成示意图^[7]; (a) 傅里叶灰度基底图案; (b) 拜耳滤镜图案; (c) 彩色傅里叶基底图案

Fig.13 Schematic diagram of color Fourier basis patterns generation in color Fourier single-pixel imaging; (a) grayscale Fourier basis pattern; (b) Bayer's filter pattern; (c) color Fourier basis pattern

若按照红、绿、蓝三种色彩的调制图案对拜耳滤镜的进行分解,从傅里叶空间来看,所得的彩色编码投影图案其傅里叶变换谱是灰度图案的傅里叶变换谱和拜耳滤镜模板傅里叶变换谱的卷积结果。由于拜耳滤镜模板的傅里叶变换谱是狄克拉函数,且狄克拉函数具有“筛选”特性,因此通过卷积可以将物体的色彩信息复制并搬移到傅里叶空间的高频部分。而由于自然图像的空间信息集中在傅里叶域的低频部分,因此这种方法可使色彩信息与空间信息在傅里叶域空间实现分离。这种分离性有利于针对实际的需求,进行物体信息的选择性采集,从而提高物体信息的获取效率。

彩色傅里叶单像素成像的实验装置如图 14 所示。为等效地实现拜耳滤镜对照明光场进行调制的效果,实验使用数字投影仪产生彩色的结构光图案并对目标物体进行照明。计算机按图 13 所示的方法生成一系列彩色的傅里叶基底图案,并控制投影仪将图案投影到目标物体上。傅里叶彩色基底图案的大小是 $512(H) \times 400(W)$ pixel,因此,重建图像的大小同为 $512(H) \times 400(W)$ pixel。物体在空间光图案照明下所得的反射光由光电池收集。

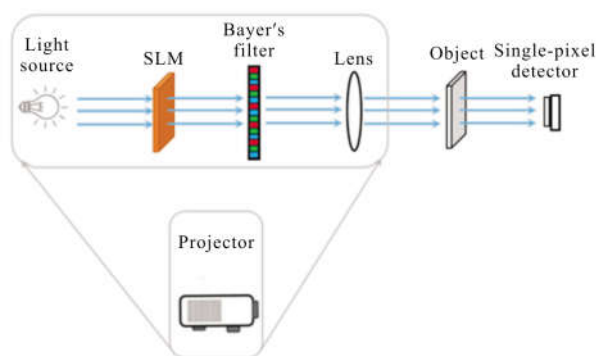


图 14 彩色傅里叶单像素成像实验装置图

Fig.14 Experimental set-up of color Fourier single-pixel imaging

为了对比全采样以及欠采样的二维彩色重建效果图,图 15(a)显示了欠采样获取的傅里叶谱,由于傅里叶谱具有周期性,在傅里叶空间的高频区域显示为八个分量,这八个分量可以重新组合成三个圆形分量,包含对应目标物体的光谱信息。然后对频谱进行二维逆傅里叶变换和色彩插值算法^[64-65]处理,重建出图 15(b)的全彩色图像。作为对比分析,实验另外采集了完整的傅里叶谱如图 15(c)所示,并且得

到相应的全彩色图像如图 15(d)所示。

通过对比观察,欠采样重建和全采样的图像重建质量相差无几。即使在采样率为 36%的情况下,目标场景的细节和颜色都得到较好的重建。在这个实验中,成像系统仅利用一个单像素探测器作为采集部件,就可以从欠采样的测量数据中完好重建出一个复杂目标场景的彩色图像。与现有的彩色单像素技术相比^[4],该技术具有两个明显的优点:首先,它可以从高压缩比中产生高质量的重建结果,而且整个过程无需任何迭代计算过程,提高了成像效率。其次,它只需要使用一个单像素探测器,降低了成像器件的成本。因此本章节提出的二维彩色傅里叶单像素成像方案解决了目前彩色单像素成像遭遇的测量次数多、运算时间长和光谱信息的获取效率低下的问题,大大提高了彩色单像素成像的实用性,为实现高质量的空间-色彩信息重建提供了新的解决方案。

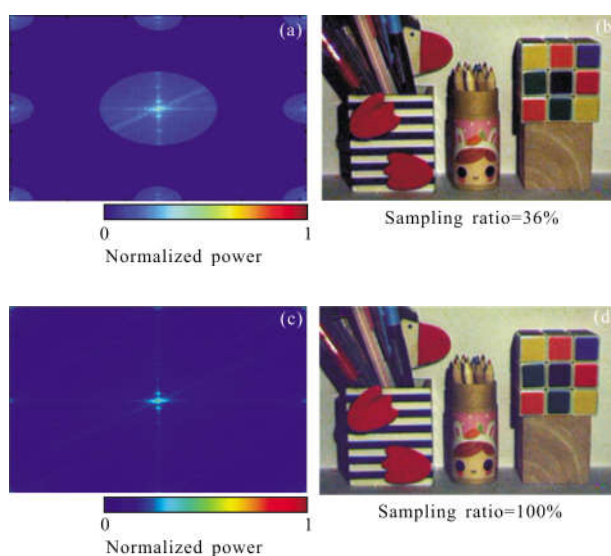


图 15 彩色傅里叶单像素成像结果^[7]; (a)采样率为 36%的傅里叶频谱;(b)根据(a)重建的彩色图像;(c)全采样的傅里叶频谱;(d)根据(c)重建的彩色图像

Fig.15 Experimental results of color Fourier single-pixel imaging^[7];

(a) Fourier spectrum with sampling ratio=36%; (b) color image reconstructed from (a); (c) fully-sampled Fourier spectrum; (d) color image reconstructed from (c)

1.4 多模态傅里叶单像素成像

通过空间光调制技术,二维傅里叶单像素成像将物体的空间信息压缩调制到傅里叶域的低频部分,三维傅里叶单像素成像将物体的深度信息压缩

调制到傅里叶域的中频部分,彩色傅里叶单像素成像将物体的光谱信息压缩调制到傅里叶域的高频部分。由于空间-深度-光谱信息在傅里叶域中彼此分离,因此,可以通过对傅里叶空间进行复用,实现空间-深度-光谱的多模态单像素成像^[7],也就是在同一个成像光路中,同时获取物体的空间-深度-光谱三个模态的信息。

如图 15 所示,对于二维彩色傅里叶单像素成像,空间信息占据了低频部分,颜色信息占据了高频部分,所以傅里叶域的中频部分是可用的。本章将研究如何进一步通过空间光调制技术,将物体的深度信息压缩调制到傅里叶频谱的中频区域,以在同一个傅里叶谱中记录物体的空间信息、深度信息和彩色信息,实现三维的彩色成像。

多模态的傅里叶单像素成像实验光路如图 16(a)所示,用作空间光调制器的投影仪在计算机控制之下产生傅里叶彩色基底图案,对目标物体进行照明,目标物体置于参考平面。单像素探测器通过探测光路接收目标物体在结构光照明下所得的反射光。探测光路由透镜组(透镜 1 和透镜 2)和光栅片组成。其中,目标物体通过透镜 1 与光栅片形成物像关系。需要注意的是,照明光路的光轴与探测光路的光轴必须成一定的夹角,且光栅片的条纹方向应垂直于照明光轴和探测光轴所成的平面。

根据亥姆霍兹互易性,图 16(a)的等效光路图如图 16(b)所示。物体在光源照明之下,光栅片的像被投影到物体的表面上,所得的像由相机拍摄得到。由于图 16(a)和(b)是满足互易性的,因此由图 16(a)的单像素成像系统重建所得的图像与由图 16(b)的传统成像系统直接拍摄的图像是完全一致的。对比二图可知,单像素探测器的作用相当于传统成像中的光源,数字投影仪则相当于传统成像中的照相机,重建图像的视场由数字投影仪的位置角度决定。实际上,图 16(b)正是傅里叶变换轮廓术的光路图。由于照明光路的光轴和拍摄光路的光轴相交于参考平面,且两条光路成一夹角 θ 关系。从相机的视角观察,投影到目标物体表面上的光栅条纹投影图案发生了形变,且形变量与目标物体相对于参考面的高度差有关,数学上可用三角几何关系^[46]证明。和 1.2 节类似,变形条纹的强度分布可以用公式(4)表示。

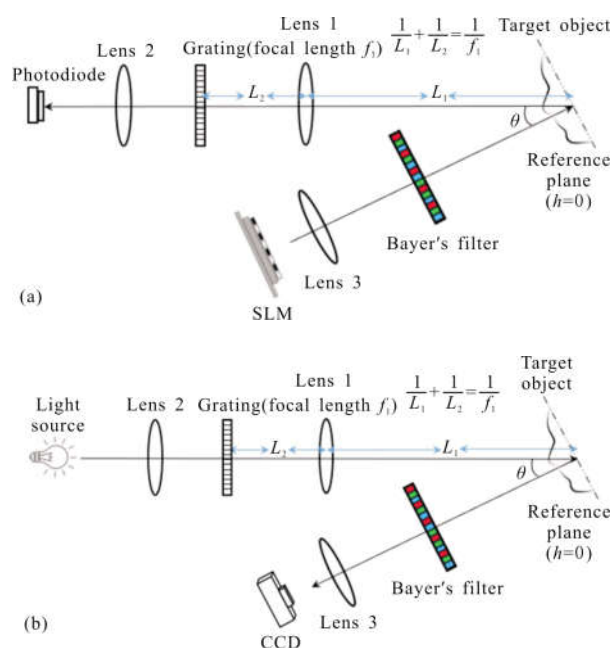


图 16 多模态傅里叶单像素成像实验装置图;(a)实际的实验装置;(b)是与(a)倒易的等效实验装置

Fig.16 Experimental set-up for multi-modality Fourier single-pixel imaging; (a) actual configuration; (b) reciprocal configuration

根据傅里叶变换轮廓术的方法,提取出变形条纹包裹的调制相位,再实施条纹解包裹分析算法,即可求得调制相位 $\Delta\phi(x,y)$ 。根据三角几何关系,可将调制相位 $\Delta\phi(x,y)$ 换算为物体表面相对于参考面的高度 $h(x,y)$,最终实现目标物体表面轮廓的三维重建。

在三维彩色傅里叶单像素成像系统中,可以通过设计光栅片的光栅常数,从而使变形条纹的载频约为 0.25 pixel^{-1} ,即中频区域。于是,可以将深度信息调制到傅里叶变换域的中频区域,避免深度信息与色彩信息和空间信息产生混叠,保证深度信息可以正确被提取。结构光照明图案的生成与投影,信号的探测与记录方法与 1.3 节的二维彩色傅里叶单像素成像一致。

图 17(a)给出了采样率为 12% 的条件下所得的傅里叶谱。测量采集次数为 24 576 次。其中,空间信息获取测量采集 4 912 次(低频部分),深度信息测量采集 18 840 次(中频部分),颜色信息采集 824 次(高频部分)。

对所获得的傅里叶谱进行二维逆傅里叶变换,可重建出如图 17(b)所示的图像。由图可见,变形的光栅掩模条纹图案分布在目标物体的表面上。由局

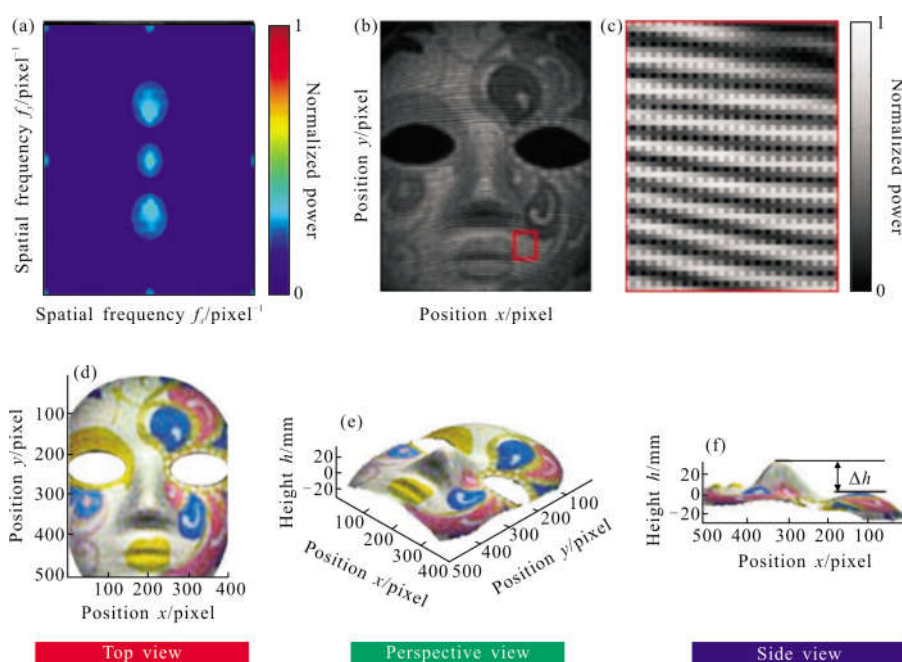


图 17 多模态傅里叶单像素成像实验结果^[7]; (a) 包含目标物体三个模态(空间-深度-彩色)的傅里叶谱, 采样率为 12%; (b) 是根据傅里叶谱(a)重建的图像, 对重建效果图选中部分区域(红色实线部分)进行放大显示; (c) 三维彩色重建上视图; (d) 三维彩色重建斜视图; (e) 三维彩色重建侧斜视图

Fig.17 Experimental results of multi-modality Fourier single-pixel imaging; (a) Fourier transform with spatial, depth, and color three modality information of target object, where sampling ratio=12%; (b) image reconstructed from (a) with partial enlargement; (c)-(e) are top, perspective, and side views of the three-dimensional reconstruction of the object

部放大图可见, 条纹的形变和物体的表面的面形是相关的。由此可知, 变形条纹编码了物体的深度信息。另外, 从重建结果还可以看出, 图像中包含了马赛克状的结构, 马赛克编码了物体的色彩信息。简而言之, 空间-深度-光谱信息三种模态被成功地编码到傅里叶谱中, 并且能够从傅里叶谱恢复出目标物体的空间-深度-光谱信息。

根据三维彩色傅里叶单像素成像的装置分布, 可推导出相位与高度的转换系数。利用转换系数, 进一步推导出如图 17(c)~(e)所示的目标物体的高度分布(三维重建)。由此可见, 三维彩色傅里叶单像素成像技术可以高效地重建高质量、全彩的三维图像。

2 应用

傅里叶单像素成像技术作为一种不同于传统成像机理的新型成像技术, 除了可应用于非可见光波段的成像外, 对解决可见光波段的一些特殊成像问题, 也具有优势。Jiang 等^[66]在 2018 年提出一种基于单像素成像技术的新型点扩散函数测量方法。相比

传统方法, 这种方法可以改善点扩散函数测量的信噪比, 提升测量质量。Chen 等^[67]在 2018 年提出了一种基于感知哈希算法的单像素非成像物体识别方案。这种方案可以快速准确地识别目标物体, 可能为非成像物体识别开辟一条新的道路。下面主要介绍两个应用: 基于单像素原理的光场显微成像和基于傅里叶单像素成像原理的光伏器件表征技术。

2.1 基于单像素原理的光场显微成像^[80]

光场显微成像术通过同时记录待测样本的空间和角度信息实现三维容积成像, 在生物医学领域有着广泛的应用。但是, 基于微透镜的光场成像方案记录角度信息必将牺牲图像的空间分辨率。尽管基于相机阵列的光场成像方案能够解决上述问题, 但相机阵列结构复杂且成本高。为了解决光场显微成像中空间和角度分辨率相互制约的问题, 提出了基于单像素原理的光场显微成像。

如前文所述, 单像素成像术作为一种新型的成像方法, 其重建图像的分辨率不是由探测端决定, 而是由空间光调制器的空间调制频率决定。空间光调

制器的最高空间调制频率即为重建图像的分辨率。基于这一特征,通过精确调制照明光场,实现对待测样品空间信息的编码,然后利用二维探测器采集编码后的信号。根据单像素成像原理,二维探测器的每一个像素均可作为一个独立的单像素探测器,并能重建出一幅待测样品的二维图像。此外,不同像素点由于其空间位置不同使得所重建的二维图像包含由样品的角度信息。因此,无需插入微透镜阵列,即可实现光线的角度信息记录。而根据单像素重建原理,二维探测器每个像素点重建二维图像的空间分辨率是由空间光调制器的空间调制频率决定。这样,就将目前限制光场显微成像空间分辨率的因素由探测端转移到照明端,而角度分辨率仍由二维探测器不同像素点的空间位置决定。从而,将影响空间和角度分辨率的因素分开,互不影响,很自然地解决了空间分辨率和角度分辨率相互制约的问题。

实验装置如图 18 所示。LED 发出的光经反射镜 (Reflecting mirror) 照射到 DMD 上; DMD 上加载一系列不同频率的傅里叶基底图案; 该结构图案通过管镜 (Tube lens) 和物镜 (Objective lens) 投影到待测样本上并将待测样本的空间信息编码成一维强度信号; 该一维强度信号最后被一个单像素探测阵列记录。

根据亥姆霍兹互易性原理,图 18 中给出的基于单像素原理的光场显微成像系统可以等效于基于 LED 阵列照明的显微成像系统,其中 DMD 等效于

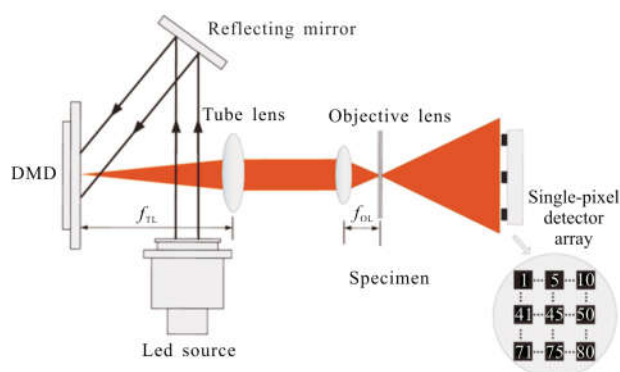


图 18 基于傅里叶单像素成像原理的光场显微成像实验装置图
Fig.18 Experimental set-up of light-field microscopy based on Fourier single-pixel imaging

二维探测器,单像素探测器阵列等效于 LED 阵列。值得注意的是,当样本放在物镜的景深范围内但偏离物镜的焦面一段距离时,不同位置单像素探测器重建的图像中的物体将会发生横向移动。根据所有单像素探测器重建的视角图像,利用参考文献[68]所提方法,合成了样本在不同深度的重聚焦图像。如图 19(a)~(e)所示,由图可知,利用所提方法能够实现数字重聚焦,获得样本在不同深度的图像。此外,根据所有单像素探测器重建的视角图像,利用参考文献[69]所提方法还能获得差分重聚焦的图像。图 19(f)~(j)给出了样本左右差分重聚焦结果,与图 19(a)~(e)给出的强度重聚焦结果不同,差分重聚焦结果能

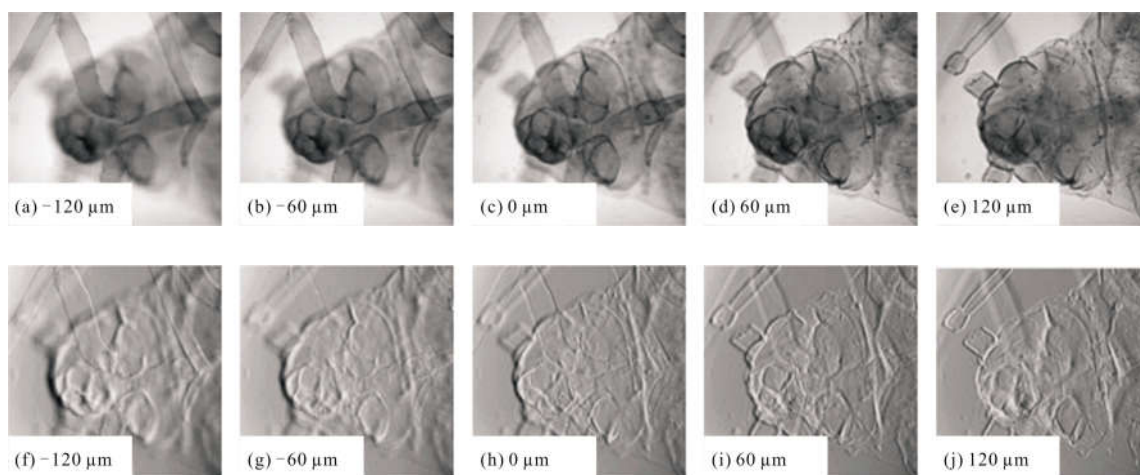


图 19 基于傅里叶单像素成像原理的光场显微成像实验结果;(a)~(e)中不同深度明场重聚焦的实验结果;(f)~(j)不同深度左右差分重聚焦的实验结果

Fig.19 Experimental results of light-field microscopy based on Fourier single-pixel imaging; (a)~(e) bright-field refocusing results for different depths; (f)~(j) left-right differential refocusing results for different depths

够更好地反映样本细节的变化信息。

综上所述,所提基于单像素原理的光场显微成像术能够实现三维容积成像,获得样本在不同深度的数字重聚焦图像。与传统的光场显微成像系统不同,所提方法能够将影响空间分辨率和角度分辨率的因素分开,从而解决空间分辨率和角度分辨率相互制约的问题,有望获得高精度的光场显微成像结果。此外,由于所提方法利用单像成像原理,因此可推广到非可见光波段,实现全波段的显微层析成像。

2.2 基于傅里叶单像素成像原理的光伏器件表征技术

Zhang 等人^[70]在 2019 年提出了一种基于傅里叶单像素成像原理的光伏器件表征技术,并提出了光伏器件的功能成像和结构成像概念。如图 20 所示,该技术使用傅里叶基底图案对光伏器件的光敏面进行照明,并利用光伏器件在结构光照明下产生的光电响应值为单像素探测器测量值,利用傅里叶单像素成像的图像重建算法,所获得的图像就是光伏器

件的光电响应函数图像,见图 21(a)。该图像可以测量光伏器件的光敏面内不同位置的光电响应强度,从而表征光伏器件的性能,不但可以筛查光伏器件是否存在缺陷,甚至对缺陷实现准确的定位。由于该图像能反映光伏器件的内部功能情况,因此称为光伏器件的功能图像(functionality image),该技术又称为光伏器件的功能成像技术。再如图 20 所示,通过使用一个旁路的探测器,收集来自目标光伏器件的反射光,利用单像素成像原理,可以对目标光伏器件进行成像,获取其反射率信息,从而表征其外部的结构情况,所得图像被称为光伏器件的结构图像(structure image),见图 21(b),该成像技术又称为光伏器件的结构成像技术。由此可见,该技术可以在同一装置中同时获取光伏器件的功能图像和结构图像。这种技术不仅有利于用户对所用光伏器件的“健康状况”进行监控,还可以有利于光伏器件制造商实施质量监控并改善其制作工艺。

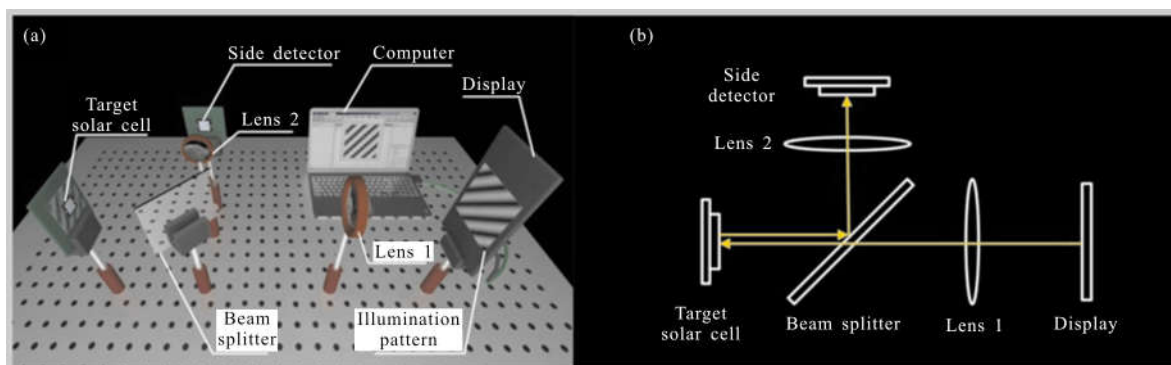


图 20 基于傅里叶单像素成像原理的光伏器件表征技术实验装置示意图^[70]; (a) 实验装置示意图; (b) 光路图

Fig.20 Experimental set-up of photovoltaic devices characterization technique based on Fourier single-pixel imaging^[70]; (a) schematic diagram of experimental set-up; (b) light path

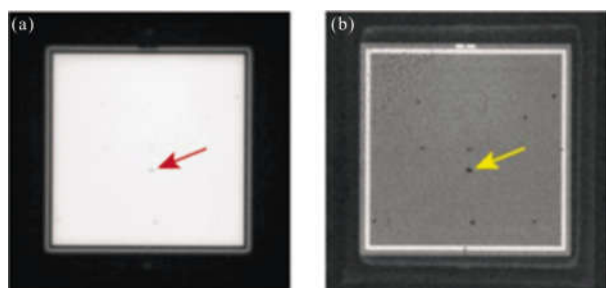


图 21 基于傅里叶单像素成像原理的光伏器件表征技术结果图^[70]; (a) 功能图像; (b) 结构图像

Fig.21 Experimental results of photovoltaic devices characterization technique based on Fourier single-pixel imaging^[70]; (a) functionality image; (b) structure image

3 讨论

为了进一步改善傅里叶单像素成像的成像质量、成像效率和将傅里叶单像素成像推广到其他特殊的应用中去,国内外学者提出了许多与傅里叶单像素成像相关的技术。

3.1 提高成像质量的改进方法

2017 年, Li^[71]等提出一种利用结构照明的单像素成像所满足的互易性消除单像素成像中阴影的技术——无阴影单像素成像。Sun 等^[72]在 2018 年提出了通过在投影系统中引入适度的离焦来抑制二值化傅里叶基底图案导致的量化误差。和传统傅里叶单

像素成像相比,这种方法重建图像的平均均方误差降低 12%,信噪比提高约 90%,使得傅里叶单像素成像可以同时实现低噪声和高帧速率。Zhang 等^[73]在 2018 年提出一种通过复用 DMD 对投影的二值化傅里叶基底图案进行空间滤波,从而获得空间频率为 DMD 上显示的图案空间频率两倍的傅里叶基底图案,实现了重建图像的空间分辨率提高了一倍的方法。Khamoushi 等^[74]在 2019 年提出了一种基于 Norton-Beer 函数改变不同傅里叶基底图案的对比度方法,该方法可以缓解傅里叶域欠采样重建图像的振铃现象,提升傅里叶单像素成像在欠采样下的成像质量。

3.2 提高成像效率的改进方法

Bian 等^[75]在 2016 年提出一种基于数据统计的傅里叶单像素成像方法,对大量图片进行统计分析,获得自然图像的傅里叶谱能量分布特征,优化了测量傅里叶系数的顺序,与基于随机图案投影的单像素成像技术相比,该方法可以将投影图案数目减少两个数量级。Xu 等^[76]在 2017 年提出了一种自适应区域单像素成像方法(Adaptive regional SPI, ARSPI),利用傅里叶切片定理,可以通过少量的傅里叶基底图案投影,确定单个目标物体在场景中的位置,从而通过减小视场的方式,有效地降低测量次数,提高成像的效率。Jiang 等^[77]在 2018 年进一步提出可确定多个目标物体的自适应区域傅里叶单像素成像方法。实验表明,相对传统傅里叶单像素成像,这种方法可以缩短约 10%的成像时间。Huang 等^[78]在 2018 年提出了一种快速傅里叶单像素成像技术,受十进制转换成二进制的算法启发,该方法对多灰度级的傅里叶基底图案进行二值分解,通过对单像素探测器测量到的光强值进行加权,在不牺牲空间分辨率的条件下,实现快速的傅里叶成像。实验证明该方法可重建出 9 帧每秒且分辨率为 128×128 的动态场景。Xiao 等^[79]在 2019 年提出了一种新颖且高效的傅里叶单像素成像方法。这种方法在测量了一小部分低频系数后,可以快速有效地估计未直接测量的高频系数,从而有效地减少测量次数,提高成像效率。

4 结 论

近十余年,随着基于空间光调制的单像素成像的研究不断深入,人们对其成像机理的认识也不断

提高。单像素成像的成像质量和成像效率也有了显著提高。基于空间光调制的单像素成像技术也被证明了可用于解决一些特殊领域的成像问题。虽然单像素成像技术研究的最初动机是为了解决非可见光成像中没有可用的阵列探测器或制作阵列探测器过于昂贵的困难,然而,经过最近十余年的研究,人们发现非可见光成像困难并没有得到实质性的解决。其原因在于,基于空间光调制技术的单像素成像核心是将成像系统的空间分辨能力从探测器转移到空间光调制器上。然而,能工作在非可见光波段的空间光调制器也存在着造价高或者难以制造的困难。

单像素成像技术目前还没有在非可见光成像得到广泛应用,但是基于空间光调制的单像素成像技术作为一种新型的计算成像技术确实是为光学成像提供了一个新的思路和开拓了新的研究领域,并且在某些特殊的领域能解决传统成像技术的困难。例如,在传统成像中,由于不同光源的光照效果会互相影响,因此人们是无法获取物体在同一时刻不同光源独立照明下的物体图像的。然而,在基于空间光调制照明的单像素成像中,利用亥姆霍兹互易性就可以通过使用多个单像素探测器来获取物体空间信息,即同时获得物体在多个不同光源独立照明下的物体图像。无阴影单像素成像和单像素层析显微成像就是应用该原理的例子。

另外,单像素探测器由于使用一个点探测器就可以实现图像的获取,而获取图像的空间分辨率也与该单像素探测器的尺寸无关。因此,可以通过制造并使用具有大感光面的单像素探测器来提高在弱光成像中的信噪比。在传统成像中,为了提高图像的空间分辨率,往往采用像素尺寸小的图像传感器来提高空间采样频率。然而,图像传感器的像素越小,其收集到的光子数越少,导致成像的信噪比越低,反而不利于弱光成像。

值得一提的是,单像素成像虽然是一种以牺牲时间分辨率来换取空间分辨率的成像策略,但在基于空间光调制的单像素成像原理启发之下,近年来还出现了免图像的物体信息获取技术。利用空间光调制器,实现直接对感兴趣的物体信息进行获取,以避免产生冗余的图像数据、传输和处理,突破了传统成像先获取图像数据,再从图像中提取物体信息的框架,甚至能实现比传统成像耗时更短或分辨能力

更强的物体信息获取技术。

综上所述,基于空间光调制的单像素成像技术作为一种新型的计算成像方法,开辟了一条全新的图像信息获取的道路。可以预见,基于空间光调制的单像素成像技术将在其他许多领域取得更加广泛的研究和关注,同时,也必将推动相关领域的进一步发展。

参考文献:

- [1] Butler P D, Silverstein S M, Dakin S C. Visual perception and its impairment in schizophrenia [J]. *Biological Psychiatry*, 2008, 64(1): 40–47.
- [2] Nakano A. Spinning-disk confocal microscopy—a cutting-edge tool for imaging of membrane traffic [J]. *Cell Structure and Function*, 2002, 27(5): 349–355.
- [3] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 83–91.
- [4] Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, et al. Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23068–23074.
- [5] Bian L, Suo J, Situ G, et al. Multispectral imaging using a single bucket detector[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24752.
- [6] Rousset F, Ducros N, Peyrin F, et al. Time-resolved multispectral imaging based on an adaptive single-pixel camera[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10550–10558.
- [7] Zhang Z, Liu S, Peng J, et al. Simultaneous spatial, spectral, and 3D compressive imaging via efficient Fourier single-pixel measurements[J]. *Optica*, 2018, 5(3): 315–319.
- [8] Studer V, Bobin J, Chahid M, et al. Compressive fluorescence microscopy for biological and hyperspectral imaging [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(26): E1679–E1687.
- [9] Hahn J, Debes C, Leigsnering M, et al. Compressive sensing and adaptive direct sampling in hyperspectral imaging [J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 26: 113–126.
- [10] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10669.
- [11] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121105.
- [12] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 605.
- [13] Stantchev R I, Sun B, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector[J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): e1600190.
- [14] Gibson G M, Sun B, Edgar M P, et al. Real-time imaging of methane gas leaks using a single-pixel camera [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 2998–3005.
- [15] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285–289.
- [16] Zhang Y, Edgar M P, Sun B, et al. 3D single-pixel video [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(3): 035203.
- [17] Goldstein T, Xu L, Kelly K F, et al. The stone transform: Multi-resolution image enhancement and compressive video [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(12): 5581–5593.
- [18] Zhang Z, Wang X, Zheng G, et al. Fast Fourier single-pixel imaging via binary illumination[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 12029.
- [19] Higham C F, Murray-Smith R, Padgett M J, et al. Deep learning for real-time single-pixel video [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2369.
- [20] Zheng J, Jacobs E L. Video compressive sensing using spatial domain sparsity [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(8): 087006.
- [21] Sankaranarayanan A C, Xu L, Studer C, et al. Video compressive sensing for spatial multiplexing cameras using motion-flow models [J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2015, 8(3): 1489–1518.
- [22] Xu L, Sankaranarayanan A, Studer C, et al. Multiscale compressive video acquisition [C]//Computational Optical Sensing and Imaging. Optical Society of America, 2013: CW2C. 4.
- [23] Wu Y, Ye P, Mirza I O, et al. Experimental demonstration of an optical-sectioning compressive sensing microscope (CSM)[J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 24565–24578.
- [24] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844–847.
- [25] Howland G A, Dixon P B, Howell J C. Photon-counting compressive sensing laser radar for 3D imaging [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(31): 5917–5920.
- [26] Howland G A, Lum D J, Ware M R, et al. Photon counting compressive depth mapping [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23822–23837.
- [27] Sun M J, Edgar M P, Phillips D B, et al. Improving the

- signal-to-noise ratio of single-pixel imaging using digital microscanning [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (10): 10476–10485.
- [28] Edgar M P, Sun M J, Gibson G M, et al. Real-time 3D video utilizing a compressed sensing time-of-flight single-pixel camera [C]//Optical Trapping and Optical Micromanipulation XIII. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9922: 99221B.
- [29] Zhang Z, Zhong J. Three-dimensional single-pixel imaging with far fewer measurements than effective image pixels[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2497–2500.
- [30] Durán V, Clemente P, Fernández-Alonso M, et al. Single-pixel polarimetric imaging [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5): 824–826.
- [31] Soldevila F, Irlés E, Durán V, et al. Single-pixel polarimetric imaging spectrometer by compressive sensing[J]. *Applied Physics B*, 2013, 113(4): 551–558.
- [32] Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, et al. Near video-rate linear Stokes imaging with single-pixel detectors[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(2): 025705.
- [33] Tajahuerce E, Durán V, Clemente P, et al. Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (14): 16945–16955.
- [34] Durán V, Soldevila F, Irlés E, et al. Compressive imaging in scattering media [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (11): 14424–14433.
- [35] Greenberg J, Krishnamurthy K, Brady D. Compressive single-pixel snapshot x-ray diffraction imaging [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 111–114.
- [36] Huynh N, Zhang E, Betcke M, et al. Single-pixel optical camera for video rate ultrasonic imaging[J]. *Optica*, 2016, 3 (1): 26–29.
- [37] Yang J, Gong L, Xu X, et al. Motionless volumetric photoacoustic microscopy with spatially invariant resolution [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 780.
- [38] Clemente P, Durán V, Tajahuerce E, et al. Compressive holography with a single-pixel detector [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2524–2527.
- [39] Soldevila F, Durán V, Clemente P, et al. Phase imaging by spatial wavefront sampling[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 164–174.
- [40] Lochocki B, Gambín A, Manzanera S, et al. Single pixel camera ophthalmoscope[J]. *Optica*, 2016, 3(10): 1056–1059.
- [41] Ota S, Horisaki R, Kawamura Y, et al. Ghost cytometry[J]. *Science*, 2018, 360(6394): 1246–1251.
- [42] Guo Q, Chen H, Weng Z, et al. Compressive sensing based high-speed time-stretch optical microscopy for two-dimensional image acquisition [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (23): 29639–29646.
- [43] Xu Z H, Chen W, Penuelas J, et al. 1 000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2427–2434.
- [44] Yu W K, Liu X F, Yao X R, et al. Complementary compressive imaging for the telescopic system [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5834.
- [45] Gong W, Zhao C, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26133.
- [46] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131110.
- [47] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306.
- [48] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [49] Sun M J, Meng L T, Edgar M P, et al. A Russian Dolls ordering of the Hadamard basis for compressive single-pixel imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3464.
- [50] Xu Z H, Chen W, Penuelas J, et al. 1000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2427–2434.
- [51] Salvador-Balaguer E, Latorre-Carmona P, Chabert C, et al. Low-cost single-pixel 3D imaging by using an LED array [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15623–15631.
- [52] Durán V, Clemente P, Fernández-Alonso M, et al. Single-pixel polarimetric imaging [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5): 824–826.
- [53] Zhang Z, Jiao S, Yao M, et al. Secured single-pixel broadcast imaging[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14578–14591.
- [54] Zhang Z, Su Z, Deng Q, et al. Lensless single-pixel imaging by using LCD: application to small-size and multi-functional scanner[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3731–3745.
- [55] Liu B L, Yang Z H, Liu X, et al. Coloured computational imaging with single-pixel detectors based on a 2D discrete cosine transform [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64 (3): 259–264.
- [56] Rousset F, Ducros N, Farina A, et al. Adaptive basis scan by wavelet prediction for single-pixel imaging [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, 3(1): 36–46.
- [57] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of

- Fourier spectrum acquisition [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [58] Peng J, Yao M, Cheng J, et al. Micro-tomography via single-pixel imaging[J]. *Opt Express*, 2018, 26(24): 31094–31105.
- [59] Zhang Z, Wang X, Zheng G, et al. Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619–19639.
- [60] Mitra S K, Kuo Y. Digital Signal Processing: a Computer-Based Approach[M]. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [61] Floyd R W. An adaptive algorithm for spatial gray-scale[C]// Proceedings of the Society for Information Display, 1976, 17: 75–77.
- [62] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977–3982.
- [63] Born M, Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light [M]. Berlin: Elsevier, 1980.
- [64] Longere P, Zhang X, Delahunt P B, et al. Perceptual assessment of demosaicing algorithm performance [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90(1): 123–132.
- [65] Malvar H S, He L -W, Cutler R. High-quality linear interpolation for demosaicing of Bayer-patterned color images [C]//2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004: iii–485.
- [66] Jiang H, Liu Y, Li X, et al. Point spread function measurement based on single-pixel imaging [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 1–15.
- [67] Chen H, Shi J, Liu X, et al. Single-pixel non-imaging object recognition by means of Fourier spectrum acquisition [J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 269–275.
- [68] Zheng G, Kolner C, Yang C. Microscopy refocusing and dark-field imaging by using a simple LED array [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 3987–3989.
- [69] Tian L, Wang J, Waller L. 3D differential phase-contrast microscopy with computational illumination using an LED array[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1326–1329.
- [70] Zhang Z, Yao M, Li X, et al. Simultaneous functional and structural imaging for photovoltaic devices [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 193: 101–106.
- [71] Li S, Zhang Z, Ma X, et al. Shadow-free single-pixel imaging[J]. *Optics Communications*, 2017, 403: 257–261.
- [72] Sun M J, Huang J Y, Penueles J. Suppressing the noise in binarized Fourier single-pixel imaging utilizing defocus blur [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 108: 15–18.
- [73] Zhang Y, Suo J, Wang Y, et al. Doubling the pixel count limitation of single-pixel imaging via sinusoidal amplitude modulation[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6929–6942.
- [74] Khamoushi S M M, Tavassoli S H. Apodized Fourier single-pixel imaging by changing the contrast of patterns using Norton-Bier functions [J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(2): 025702.
- [75] Bian L, Suo J, Hu X, et al. Efficient single pixel imaging in Fourier space[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(8): 085704.
- [76] Xu B, Jiang H, Zhao H, et al. Projector-defocusing rectification for Fourier single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 5005–5017.
- [77] Jiang H, Liu H, Li X, et al. Efficient regional single-pixel imaging for multiple objects based on projective reconstruction theorem[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 110: 33–40.
- [78] Huang J, Shi D, Yuan K, et al. Computational-weighted Fourier single-pixel imaging via binary illumination [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16547–16559.
- [79] Xiao Y, Zhou L, Chen W. Fourier spectrum retrieval in single-pixel imaging [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 1–11.