

·特邀综述·

散斑相关成像:从点扩展函数到光场全要素

谢向生^{1,2}, 刘忆琨¹, 梁浩文¹, 周建英^{1*}

¹中山大学物理学院, 广东 广州 510275;

²汕头大学理学院物理系, 广东 汕头 515063

摘要 散射光学成像恢复是光学成像领域最重要的研究课题之一。科学家已经提出各种技术实现不同散射环境下的成像恢复。其中,散斑相关性的解卷积技术具有成像质量高、恢复速度快和易于集成等优点。简要综述了散斑相关成像的进展,从光学记忆效应和解卷积原理出发,介绍点扩展函数新物理特性及其在成像恢复中的应用,总结点扩展函数的间接获取方法,最后提出光场全要素(plenoptics)的概念。光场的全要素探索有望在更复杂散射环境中提供更全面的信息,使散射光学成像技术在生物、医疗、海洋、军事和日常生活等场景中更具应用前景。

关键词 成像系统; 散斑相关成像; 散射介质成像; 散射

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0111004

Speckle Correlation Imaging: from Point Spread Functions to Light Field Plenoptics

Xie Xiangsheng^{1,2}, Liu Yikun¹, Liang Haowen¹, Zhou Jianying^{1*}

¹School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

²Department of Physics, College of Science, Shantou University, Shantou, Guangdong 515063, China

Abstract Restoration of scattered optical imaging is among the most important research topics in optical imaging. Various techniques have been proposed for the restoration of imaging in different scattering environments. The deconvolution-based method using speckle correlations is a promising technique achieving high image quality, fast recovery speed, and ease of integration. Herein, we briefly review the current progress of speckle correlation imaging. After discussing the principle of optical memory effect and deconvolution, we introduce new physical characteristics of the point spread functions (PSF) and their applications to image recovery processes, concluding with indirect methods for obtaining the PSF. Finally, a new concept called plenoptics is introduced. Studies on the plenoptics of light fields are expected to provide more information in more complex scattering environments and realize specific applications of scattering optical imaging technique in biology, medicine, ocean, military, and daily life.

Key words imaging systems; speckle correlation imaging; imaging through scattering media; scattering

OCIS codes 110.0113; 110.5405; 290.5855

1 引 言

人类从外界获取信息的主要方式是通过眼睛的光学成像。随着科学技术的不断发展,人的“视域”已从眼睛的生物器官极限拓展到仪器的物理极限上。但是,如何克服散射影响进行光学成像仍然是限制人类社会活动的重要科学问题^[1-3]。比如,天文观测上,地面天文台受到大气和云层的扰动,只能看到闪烁的星星和模糊的光影;卫星遥感光学也受散

射的影响,图像利用率很低;在烟雾、雨雪等恶劣环境下,人们驾驶存在安全隐患;生物医学领域,显微成像需要采用切片层析的方式将待研究的组织皮层薄层分离出来。

科学家经过几十年的努力,提出了多种克服散射影响的成像恢复方法^[4],代表性的技术包括波前整形^[5-8]、自适应光学技术(AO)^[9-10]、飞行时间法(TOF)成像^[11-12]、时间反转或相位共轭^[13-19]、传输矩阵法^[20-23]、全息法^[24-26]、散斑相关^[27-37]等。其中,

收稿日期: 2019-09-05; 修回日期: 2019-10-29; 录用日期: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(11534017,61575223,61475038)、汕头大学科研启动基金资助项目

* E-mail: stszjy@mail.sysu.edu.cn

散斑相关被认为是一种很有前途的解决方案,只需采用非相干光照明(接近于日常环境照明),不需要昂贵的激光器、光场调控器件和复杂的机械扫描或控制系统,展现出强大的应用潜力。Bertolotti等^[36]和Katz等^[37]分别实现了非侵入式的散斑相关成像,利用解自相关方法实现了单次非侵入式的成像恢复。Antipa等^[38]采用特制准散射体实现了无透镜散射相机。Valent等^[39]发现不同散射介质有特定的散斑谱,可利用神经网络进行机器训练,并用线性区分算法进行识别。Saunders等^[40]仅用一台普通数码相机拍摄墙上模糊不清的光影,结合遮挡物评估算法实现了廉价的视线外(NLoS)成像。在散斑解自相关成像过程中,散斑往往被认为是一种混乱的、无序的分布,可以采用系综平均或低频拟合进行本底扣除,进而通过帕塞瓦尔定理(散斑功率谱密度/协方差函数和自相关函数互为傅里叶变换)结合迭代算法进行^[41-42]成像恢复。然而,这种看似混乱的、无序的光强空间分布,具有部分共同的分布特征,称为散射系统的点扩展函数(PSF)。它在一定的范围内满足线性平移不变性,并且可以反映出散射系统的成像特性。2016年,周建英团队^[43]和Scarcelli团队^[44]先后提出将解卷积技术用于薄散射体后的成像恢复和显微成像中,得到了实时、彩色、大视角和超分辨的成像恢复结果。解卷积与解自相关所依赖的物理机理(散斑相关性)是一致的,但前者却具有更高质量、更高信噪比和更快恢复速度的优点。由于解卷积过程中散斑会隐含众多细节及特殊(关联)相关性,散射光学成像的光场全要素(plenoptics)研究将会是一个重大的研究方向。探索散射光场高维度信息,包括相位、偏振、强度、时空关联等的信息表述方式、探测方式和信息关联程度有望提取更多丰富的对象目标信息。一方面,利用解卷积方法的高质量成像和点扩展函数代表的系统信息可用于研究散射成像过程的物理机理,另一方面,光场全要素的探索为研究更强散射、更厚介质的深穿透成像提供新的技术支持,有望建立散射光学成像相关领域的新理论和新方法,实现各种复杂环境下的散射增强光学成像。本文将总结基于解卷积的散斑相关成像技术的最新进展,并展望散射成像过程中光场全要素的应用前景。第二部分简要介绍散斑相关成像的物理基础和卷积方法的原理;第三部分讨论如何利用已知的点扩展函数实现散射介质的高质量成像,并研究其中的新物理机制;第四部分讨论点扩展函数的间接获取方法及光场全要素成

像相关的研究成果。

2 光学记忆效应和解卷积原理

散斑相关成像技术(包括解自相关方法和卷积方法)所依赖的物理基础和关键是光学记忆效应(OME)^[45-46]。它是Feng等^[45]计算散射介质传输系数的关联函数时发现的一种重要的现象:当散射介质的入射激光转动一个小角度,其出射散射光也随之转动相同的角度。散射光形成的散斑图案似乎存在散射介质的记忆中,他们将此现象命名为光学记忆效应。随后Freund等^[46]在实验上验证了这个结论。记忆效应属于关联函数的第一阶效应,其表达式为

$$C(qL) = [qL / \sinh(qL)]^2, \quad (1)$$

式中: $q = 2\pi/\lambda$, λ 为入射的光波波长; L 为散射介质的厚度。图1^[47]是记忆效应的示意图和实验测得标准散射体的关联函数。记忆效应的有效角度范围随着散射介质厚度的增加而减小,最大角度约等于 $\lambda/2\pi L$,可见,随着散射介质厚度的增加,记忆效应角度范围将减小,不利于散斑相关成像技术的应用。幸运的是,2015年Judkewitz等^[48]发现并实验证实了一种新的记忆效应——平移光学记忆效应,有别于传统角度关联光学记忆效应(称为角度记忆效应)。如图2所示,平移光学记忆效应是指入射光平移,出射光也跟着平移。平移记忆效应能用于厚散射介质和整个空间充满散射介质的情形,克服了角度记忆效应的薄散射介质局限和自由衍射局限。因此基于平移记忆效应,散斑相关成像技术可以找到新的成像方法来突破当前传统记忆效应的限制^[49]。

由于光学记忆效应的存在,散射介质所在的光学系统拥有一个或数个扩展函数。该点扩展函数不再是艾里斑,而是空间弥散的散斑分布。点扩展函数在记忆效应范围仍然满足线性平移不变性,因此,当采用非相干光照明时,成像的强度分布(成像散斑)可以表示为物函数和系统(强度)点扩展函数的卷积。

$$I_i(x_i, y_i) = F(x_i, y_i) \iint h_I[(x_i, y_i); (x_o, y_o)] I_o(x_o, y_o) dx_o dy_o, \quad (2)$$

式中:下标*i*和*o*分别为成像平面和物平面; $F(x_i, y_i)$ 为一个与记忆效应相关的形状因子函数^[45-46],具有角度相关的钟形曲线; h_I 为强度点扩展函数。当忽略*F*函数,(2)式也可以改写成 $I = O * F_{PS}$ 的形

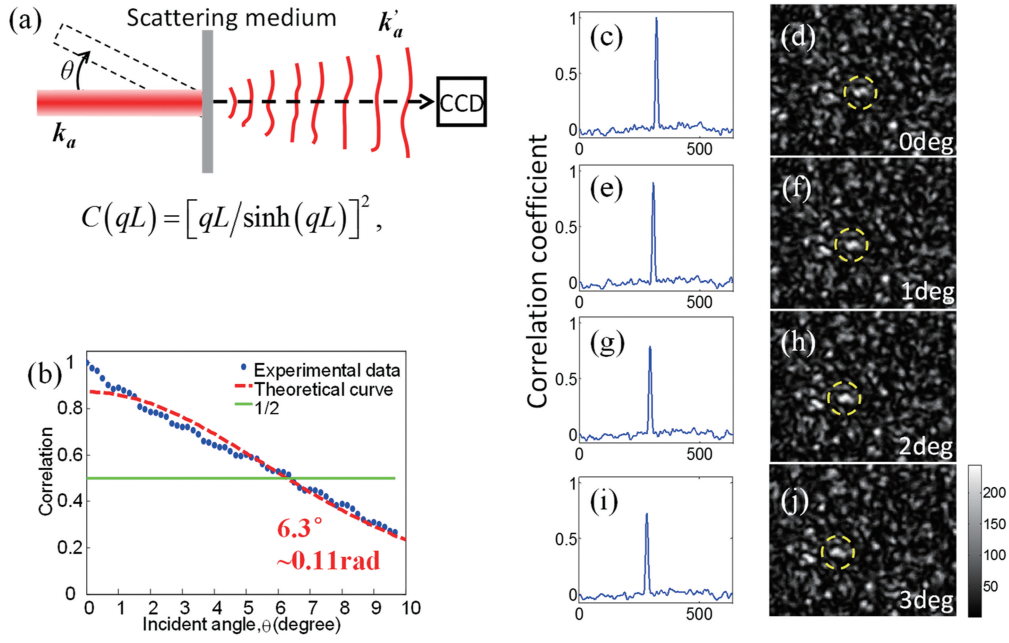


图 1 散射介质的记忆效应^[47]

Fig. 1 Optical memory effect of scattering medium^[47]

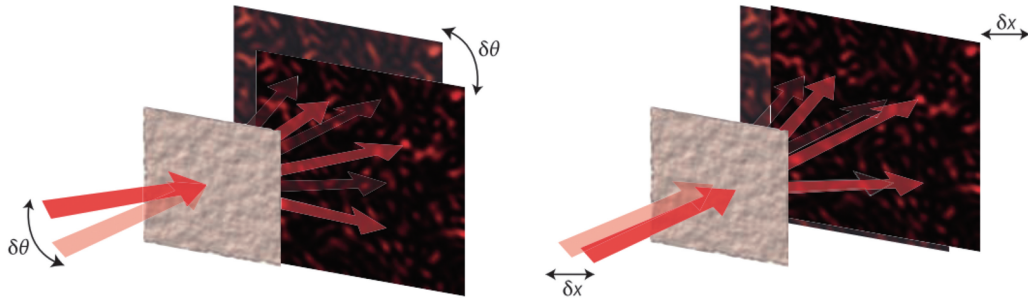


图 2 传统的角度记忆效应和平移记忆效应^[48]

Fig. 2 Traditional angular memory effect and translated memory effect^[48]

式,其中 $*$ 表示卷积运算符, F_{ps} 表示点扩展函数形式。因此,如果检测或估计薄散射介质的点扩展函数,则可以通过其散斑图案 I 和系统点扩展的解卷积来重建物体的图像。人们提出了很多的解卷积算法,比如基于迭代的 Lucy-Richardson 解卷积^[50-51]、基于小波的解卷积^[52]和基于变换域正则化的解卷积^[53]等。其中最常见解卷积算法是维纳(Wiener)滤波,它可表示为

$$F[O(x,y)] = \left\{ \frac{F[F_{ps}(x,y)]^* F[I(x,y)]}{|F[F_{ps}(x,y)]|^2 + \frac{S_N}{S_O}} \right\}, \quad (3)$$

式中: $S_N = |F[N(x,y)]|^2$,为噪声 $N(x,y)$ 的功率谱; $S_O = |F[O(x,y)]|^2$,为未退化图像的功率谱。噪声的功率谱和未退化图像的功率谱不一定能获得,所以经常近似为 $\frac{S_N}{S_O} = \frac{1}{R_{SN}} \approx k$,其中 R_{SN} 是信

噪比, k 值取决于实验条件而交互性选择。

非相干照明是散斑相关成像的关键之一。最典型的非相干光产生方法是用相干度很高的激光通过旋转的毛玻璃^[36-37]。毛玻璃表面的随机起伏使得激光空间上产生附加的随机相位,所以产生的光束具有空间非相干性。被该光场照明的任何两个物点都完全不相干,但每个物点自身仍然有很好的时间相干性,因此该方法产生的散斑具有很高的对比度和信噪比。另外一种更贴合日常应用环境的非相干光照明则直接采用了 LED 光^[43]照明。LED 芯片的发光面具有完全空间非相干性和部分时间相干性,采用 LED 直接照明的物体则混合了时空的相干性,因此具有很低的空间相干和时间相干。用 LED 照明所产生的散斑的对比度很低,应用到解自相关恢复时成像质量很差。由于解卷积方法对散斑信噪比的要求不高,因此即使采用 LED 照明方式也可以得

到很好的恢复质量。提高 LED 照明的成像质量最简单的方法是采用窄带滤波提高照明光场的时间相干性,进而提高散斑的对比度;另外一个简单的方法则是把 LED 芯片的发光面成像在物体表面进行照明,从而使得物体的表面也具有完全的空间非相干性和部分时间相干性。

3 利用点扩展函数新物理特性提高散射介质后的成像质量

基于解卷积的散斑相关成像恢复的前提是光学记忆效应,同时,光学系统的光阑(入瞳和出瞳)同样也会对成像的视场(FOV)有所限制,只有在记忆效应范围和视场范围内测试物体,才有可能实现成像恢复。光学记忆效应主要受散射介质的等效厚度 L 限制,这导致散射系统的视场非常有限(散射介质的视场通常小于其他元器件的硬光阑)。(2)式中的形状因子 F 其实就是横向的视场(V_F),定义为 $V_F \sim \lambda d_o / \pi L$,其中 d_o 是物平面和散射介质之间的距离。散射成像系统的景深(DOF, D_F)可以根据视场推导出来, $D_F \sim V_F \cdot d_o / D$,其中 D 是散射介质上被照射点的直径^[46]。由此可见,散射成像系统的视场和景深与散射介质的有效厚度成反比,比如常见的光学薄膜散射器的等效厚度约为几微米(例如:Newport 5°圆形光整形散射器),系统的视场和景深在几十毫弧度和几毫米左右(在 $d_o = 15 \text{ cm}$, $\lambda = 550 \text{ nm}$, $D = 5 \text{ mm}$ 的条件下)^[43,54]。因此,解卷积成像恢复技术对宏观物体成像的第一个挑战便是打破光学记忆效应的限制,并扩大系统的视场和景深。其次,解卷积方法需要知道薄散射介质的点扩展函数,传统的做法就是植入一个物点来探测它的散斑,所以第二个挑战是点扩展函数的非侵入获取。第三,当前的解卷积算法均是用现成的数字图像处理噪声模型——主要是白噪声背景,比如最常用的 Wiener 滤波,该滤波与散斑相关成像的物理噪声无关,解卷积成像恢复效果不理想。最后,被测量物体的频谱属性也包含重要信息,解卷积散射成像方法需要具备光谱分辨成像的功能。

为解决上述挑战和需求,研究人员探索了薄散射介质的点扩展函数的物理特性,并在不同成像领域取得了一定的进展。下面介绍视场和景深的扩展、点扩展函数的非侵入获取、Wiener 滤波的改进及光谱分辨重建等工作。

3.1 操控点扩展函数提高视场范围

在散射成像系统中,散射介质通常也被称为散射透镜,因此成像光路经常简单摆放,如图 3(a)所示,然而,这种情况不能充分利用散射光的相关性。一方面,成像传感器 CCD 有限的面积只能捕获部分相关散斑(矩形范围),该范围小于从成像空间观察的记忆效应范围(圆圈范围),而记忆效应范围通常小于系统其他硬光阑(出瞳)的组合(虚线圈);另一方面,超出光学记忆效应范围外的物点衍射光会导致散射介质上的重叠区域较小,从而降低散斑的相关性。因此,图 3(a)简单摆放的成像系统的视场将远小于散射介质的记忆效应范围。在分析了散射成像系统的视场限制后,Zhuang 等^[43]采用简单的点扩展函数操作方法,即在散射介质后方插入一片透镜,用来收集大部分散射光用于成像,并将入射光瞳中的图像放大以匹配 CCD 尺寸,如图 3(b)所示。因此,出射光瞳内的散斑图案的相关性得到了增加,且视场被扩大到接近记忆效应的范围,如图 3(c)所示。同时,引进显卡并进行 Wiener 滤波,能实现毫秒量级的高速恢复,结合彩色 CCD 拜耳滤波实现了三基色分离、处理和复合,如图 3(d)所示,系统最终实现了实时彩色大视场的动态成像恢复。

对于尺寸超过散射成像系统视场范围的物体 O ,可以根据散射系统的不同观察区域将其分成 N 个部分。物体的散斑图案 I 可以被认为是来自物体各个区域集合 $O = \sum_i O_i$ 的散射光的组合 $I = \sum_i I_i = \sum_i (O_i * F_{\text{PS}_i})$ 。由于记忆效应范围之外的任意两个点源产生的散斑图案是完全不相关的,即 $F_{\text{PS}_i} * F_{\text{PS}_j} = \delta_{ij}$,其中 $*$ 表示相关算子,因此,可以通过总散斑图案 I 和相应的 F_{PS_i} 的解卷积来获得相应区域物体 O_i 的重建图像,并最终合成所有区域的物体。根据这个原则,Li 等^[55]和 Tang 等^[56]通过预先检测或测量来自不同区域的点扩展函数,实现了超过记忆效应的大视场恢复成像的目的。

3.2 操控点扩展函数增加成像景深

除了视场这个横向信息之外,物体的轴向信息也非常重要。散射介质记忆效应通常较小,从而导致景深有限。Antipa 等^[38]利用一种定制的超大记忆效应范围的准散射体实现了解卷积三维成像恢复。Liao 等^[57]利用检测不同轴向位置的一系列点扩展函数,通过组合实现了轴向景深的扩展。然而,嵌入不同物平面的物点并探测对应的点扩展函数使成像过程显得复杂。Xie 等^[58]发现了不同物平面点

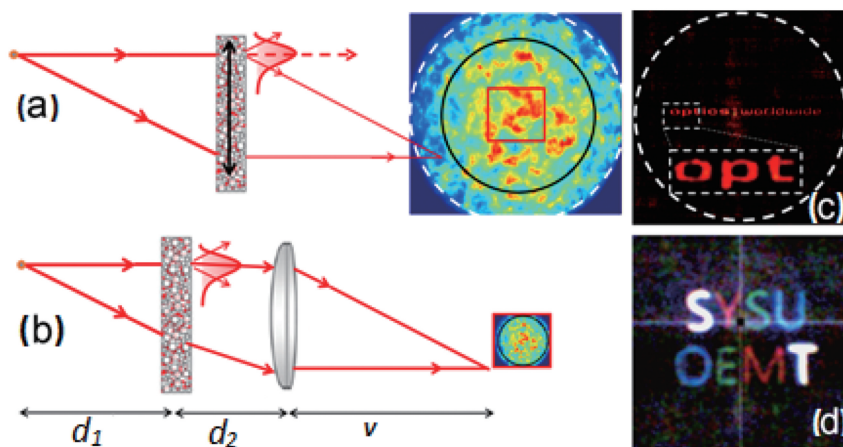


图 3 通过增加辅助透镜调整 PSF 实现视场的扩展^[34]。(a)无辅助透镜的相关成像示意图;(b)有辅助透镜的相关成像示意图;(c)超大视场成像恢复;(d)彩色成像恢复

Fig. 3 FOV extended by additional imaging lens used for adjusting PSF^[34]. (a) Schematic of correlation imaging without assistant lens; (b) schematic of correlation imaging with assistant lens; (c) restoration of image with large FOV; (d) restoration of color image

扩展函数具有特殊的关联,即只需要测量一个物平面的点扩展函数,通过一个缩放因子便可以推导出其他物平面的点扩展函数。缩放因子导出的公式为 $m = f/f'$, 其中 f 和 f' 为散射透镜的焦距。实验过程只需要中间物体“H”的点扩展函数,如图 4(a)所示,直接计算不同平面的点扩展函数之间的互相关会得到很低的数值,但是通过 m 倍的缩放后,它们的点扩展函数看起来非常相似,具有高度的相关性,如图 4(b)所示。实验结果表明,与没有点扩展函数操控的原始方法相比,有点扩展函数操控的方法的轴向分辨率提高了约 5 倍,能够从单幅散斑图中恢复出超过系统原始景深的三个物体,如图 4(c)所示。文献[58]同样指出,教科书^[59]描述的散斑的分辨率、视场范围和景深,均是在平面光照射情况下得到的,这与成像过程中物光是发散的情况不同,因此这三个参数均需要进行一定的修正。缩放点扩展函数的方法本质上就是让散斑轴向景深往轴向上的记忆效应范围靠近。另外散射透镜成像过程不同于普通透镜,是变焦距的“透镜”。如图 5 所示,若物体所在平面不同位置的点扩展函数均能够被探测,则由不同点扩展函数恢复的部分物体可以组合成整个物体的成像。

3.3 解卷积 Wiener 滤波器的优化

在散斑相关成像应用中,由于散斑噪声的模型分析不充分, R_{SN} 通常设定为常数^[43,57]。看似混乱的、无序的散斑,实际在解卷积过程中以信号的形式存在。究竟哪些散斑是信号,哪些是噪声,取决于这些散斑与点扩展函数的相关程度。Chen 等^[60]提

出,散斑图案只要落在记忆效应范围内就是信号,范围外则是噪声。通过建立一个模型来研究散射光传输的过程,推导出散斑相关成像的噪信比 R_{SN} 为

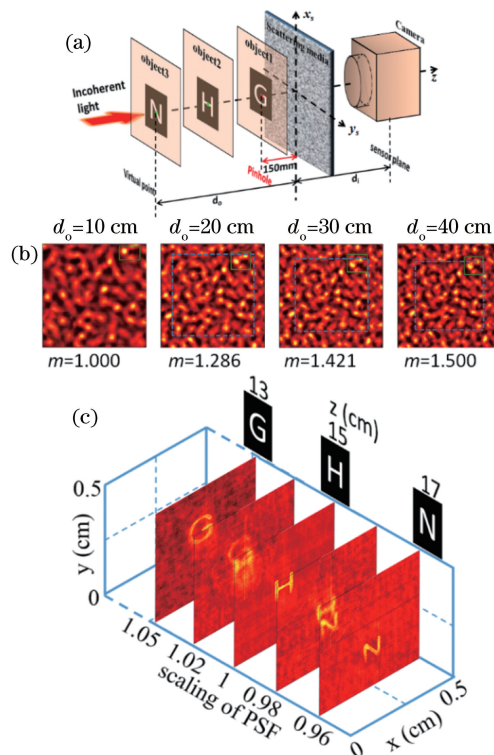


图 4 操控 PSF 实现 DOF 的扩大。(a)实验示意图;(b)不同物平面 PSF 的分布;(c)三个不同景深物体的同时恢复^[58]

Fig. 4 Enlargement of DOF by PSF manipulation. (a) Experimental setup; (b) distributions of PSF at different object planes; (c) simultaneous restoration of three objects with different DOFs^[58]

$$R_{SN} \approx \frac{|1 - \tilde{F}|^2}{|\tilde{F}|^2}, \quad (4)$$

式中： \tilde{F} 为(2)式中形状因子 F 的傅里叶变换。如

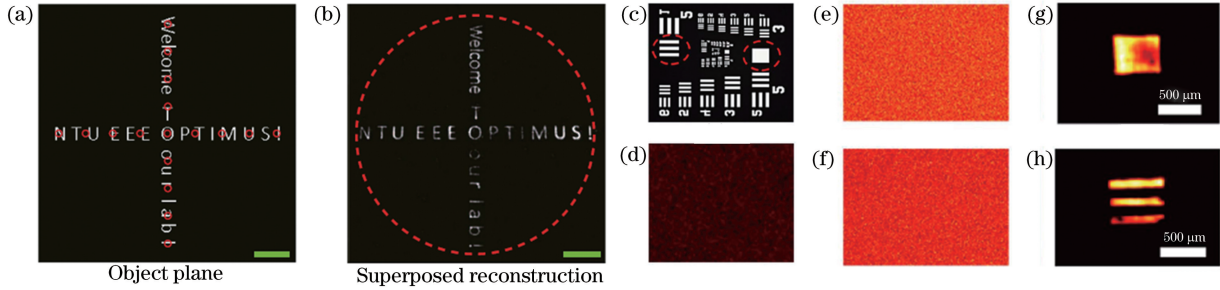


图 5 通过多点扩展函数和空间解复用的 FOV 增大^[55-56]。(a)圆圈表示多个 PSF 测量的点源；(b)虚线圈表示扩展后的视场；(c)虚线圈表示待测试的样品范围；(d)整个样品的散斑；(e)(g)方孔的散斑及其恢复图像；(f)(h)三横线的散斑及其恢复图像

Fig. 5 Enlargement of FOV by multiple PSFs and spatial de-multiplex^[55-56]. (a) Circles indicate point sources for measuring multiple PSFs; (b) dotted circle represents expanded FOV; (c) dotted circle represents range of sample to be tested; (d) speckle pattern of whole sample; (e)(g) speckle of square hole and its recovered image; (f)(h) speckle of triple-slit's region and its recovered image

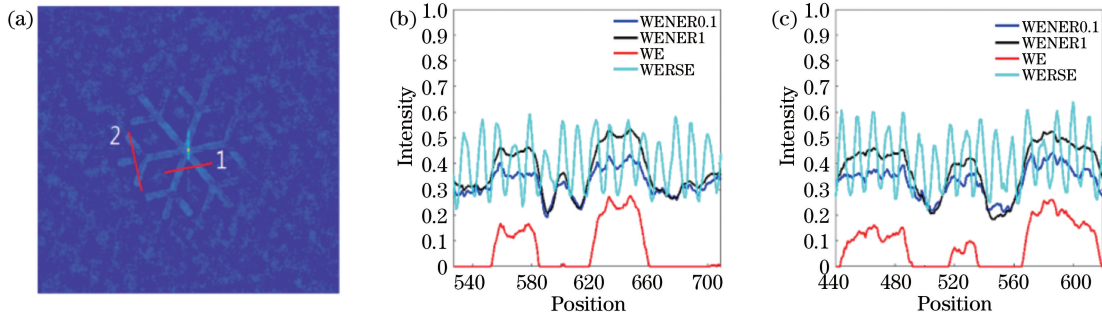


图 6 基于记忆效应的 Wiener 滤波改进的解卷积结果。(a)恢复的雪花图案；(b)(c)不同方法恢复图 6(a) 中“1”和“2”两个横线位置的强度分布^[60]

Fig. 6 Improved deconvolution results of Wiener filtering based on memory effect. (a) Recovered snowflake pattern; (b)(c) intensity distributions of cross-sections marked with “1” and “2” in Fig. 6(a) by different methods^[60]

4 点扩展函数的间接获取及光场全要素探索

4.1 已知物体到未知物体的恢复

直接获取点扩展函数的解卷积成像恢复,通常是先在物平面放置一个针孔或者引导星,然后再用物体代替针孔拍摄两次散斑进行恢复,这种方式在现实操作中比较繁琐。由于系统点扩展函数可以通过多种方式获得,并且在现实环境中存在获取的条件,间接获取点扩展函数的方法具有更广泛的应用范围。Xu 等^[61]提出一种借助已知参考物体,通过薄散射介质重建被测物体的新方法。如图 7 所示,当参考物体为“H”形状及其散斑的分布 S_H 能预先获取时,该模型可以从整体的散斑图案 S_{sum} (包含“T”和“H”两个形状的字母掩模)中恢复出目标

图 6 所示,采用优化方法恢复的物体中心和边缘具有更好的一致性,背景噪声抑制效果显著。

“T”,解卷积恢复的表达式为

$$H + T = F^{-1} \left\{ \frac{\mathcal{F}(H) \times \mathcal{F}(S_{sum})}{\mathcal{F}(S_H)} \right\}, \quad (5)$$

式中： \mathcal{F} 为傅里叶变换算符； H 和 T 分别为物体“H”和“T”的空间分布函数。可见,求解未知物“T”的轮廓,不需要直接解卷积,而是由已知物散斑和已知物的空间频谱比值代替点扩展函数的频谱,所有物体的频谱等于总散斑频谱与该频谱的比值。这种方法可以有效提高信噪比,能避免针孔测量点扩展函数的低功率现象。同时 Chen 等^[60]也证明了这种方式相比于信噪比设置为常数的 Wiener 滤波,更能体现记忆效应对散斑信噪比的影响,从而提高成像质量。Yang 等^[62]也提出了利用已知物和未知物的关联,实现已知物辅助下的散射成像恢复。从应用角度讲,这种方式可以在已知某物体情况下,实现

散射介质下的未知物体成像,例如,通过 X 射线技术,超声波成像^[63]或皮肤下的其他技术检测到的器官可以作为参考的已知物体^[64-65]。

4.2 非侵入式点扩展函数的估计

从有先验目标到无先验目标是散射成像领域的重要发展方向,如果植入一个参考物点难以实现,还可以在解卷积重建图像之前,用各种方法去探索薄散射介质的特性。这种方法的思路跟扫描、全息干涉等测量散射介质的传输矩阵思路相

似,但解卷积散射成像方法仅需要获得散射系统的点扩展函数。Li 等^[55]提出图 8 所示的空间相关结构以获得散射介质的强度传输矩阵,可灵活获取不同空间位置上的点扩展函数^[55]。该方法测量点扩展函数的关键是检测共轭平面 CCD_r 上的光场强度,并可利用透射散斑和入射光的关联性,这种技术可以获得对应物平面上任何位置的点扩展函数,因此理论上成像的视场取决于物体被照明的面积。

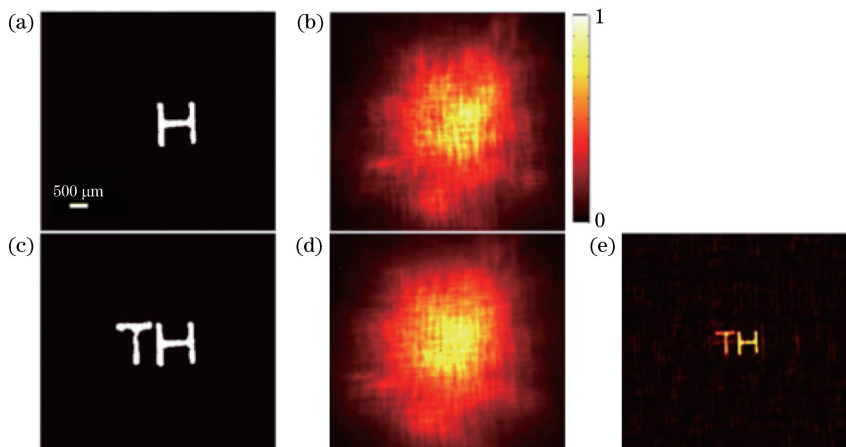


图 7 从已知参考物到未知物的恢复方法。(a)(b)已知参考物“H”及其散斑分布;(c)(d)已知参考物和未知物同时存在的图像及其散斑分布;(e)恢复的图像^[61]

Fig. 7 Recovery method from known reference to unknown things. (a)(b) Known reference “H” and its speckle pattern; (c)(d) image with known reference and unknown things and its speckle pattern; (e) recovered image^[61]

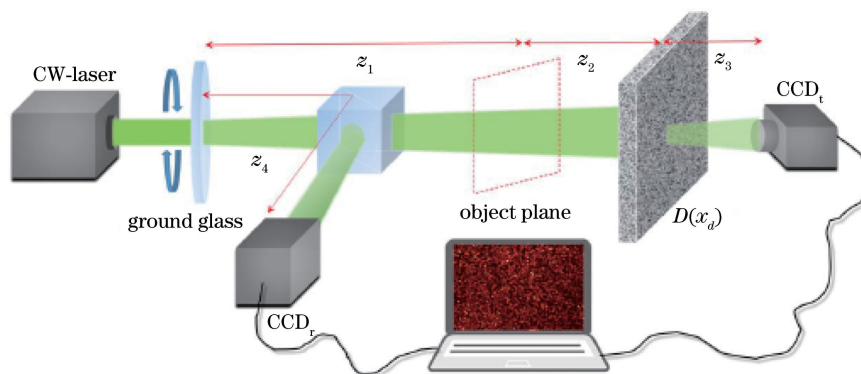


图 8 通过空间相关方法测量 PSF。虚线方框表示物平面,当 $z_1 = z_4$ 时,物平面与 CCD_r 是空间相关联的^[55]

Fig. 8 PSF measured via spatial-correlation method. With $z_1 = z_4$, object plane marked with dotted rectangle becomes conjugate plane of CCD_r under spatial correlation^[55]

此外,如果物点或者关联照明均不可以侵入式地放置到系统中,还可以通过散斑估计的方法得到系统的点扩展函数。Wang 等^[66]报道了一种散斑图案的估计方法:在一系列目标作为训练输入后,通过散斑相关和相位检索直接重建训练目标的图像;然后,应用散斑建模和约束最小二乘优化来估计散斑图案的分布;最后,从所获取的积分强度矩阵中对估

计的散斑图案进行反卷积来重建待观察目标的图像。Wu 等^[67]报道了一种利用一系列散斑图案的相位差法实现非侵入的点扩展函数估计。Han 等^[68]利用物体本身具有的陡峭边界梯度,如图 9 所示,散射介质后的散斑像是该陡峭边界与系统点扩展函数的卷积,从而可以推导出边界点扩展函数,进一步再估算出散射环境的系统总点扩展函数,进而恢复出

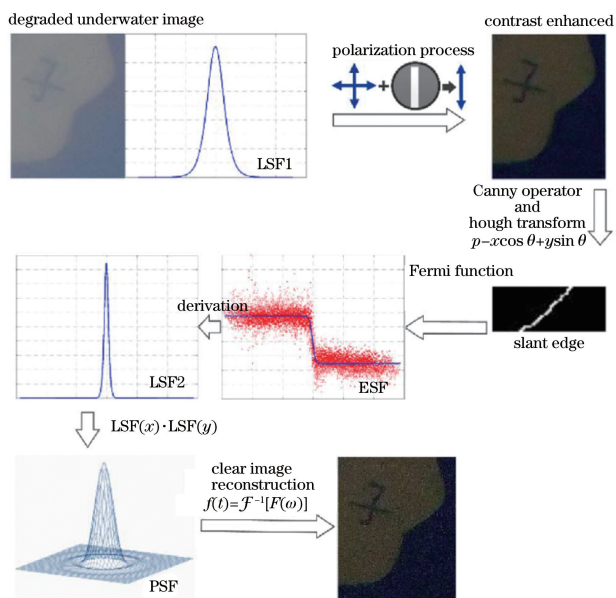


图 9 利用物体边界的 PSF 估计方法及动态水体下的散射成像恢复过程^[68]

Fig. 9 PSF estimated by object-boundary method and recovery process of scattering image under dynamic water^[68]

混浊水体内的物体成像。

4.3 光场全要素成像恢复

随着散射成像领域的快速发展,人们对各种成像技术充满期待,提出了更多更复杂的成像环境要求。然而,复杂环境的“厚”散射程度和多变特性导致散射光场相干性迅速降低,基于弹道光子和蛇形光子的传统相干成像方法均难以适用。复杂环境的多变特性使得光场在传播过程中变得异常复杂,散射光场相位、振幅、偏振、相干性等物理量高度耦合且随传播过程会发生变化。如何对这些要素信息进行客观表述,分析它们与散射特征参数之间的变化关系,建立相关领域光学散射成像理论将会是全新的研究课题和重要的研究方向。

如(2)式所示,传统的点扩展函数 $h_l[(x_i, y_i); (x_o, y_o)]$ 只是一个二维的强度空间分布函数。在点扩展函数的操控并实现散射成像视场和景深扩展的过程中,点扩展函数存在特殊的空间关联,这种关联本质上有更多的物理量相关,从基尔霍夫到菲涅耳理论,无论近场还是远场,光场传播过程均与偏振、相位、波长、振幅等光场要素息息相关。我们有理由相信关于光场全要素的探索有望进一步提升散斑相关成像技术的恢复能力和应用范围,使其在各种实际应用场合中更加高效。当前已经有不少的团队开始探索散射成像中更多的信息量,除了物体的空间三维分布外,最被关注的就是目标物频谱所携

带的重要信息。由于光散射被认为是高度分散的过程,不同波长的散斑图案之间的相关性通常是被限制在窄带宽内的,因此获取多谱成像或颜色重建最简单的方法就是用滤色片将其分开。例如,Zhuang 等^[43]使用彩色 CCD 本身的内置滤色器将点光源和测试对象的光线分离为 RGB 通道,将三基色通道的重建结果组合以恢复被测物体的彩色图像,如图 10(d)所示。Li 等^[69]用压缩传感的方法从单张黑白的散斑图中实现三基色散斑的分离并恢复出图像。

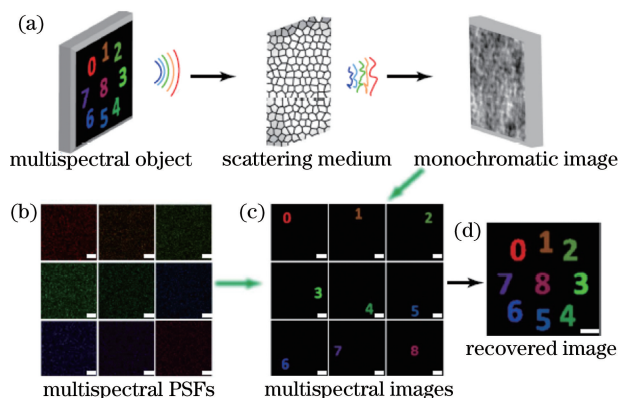


图 10 采用单色相机单次拍照的多光谱成像示意图。(a)多光谱物体的光通过强散射介质传播,在单色相机上产生的散斑图案;(b)通过不同光谱照明单个针孔的多光谱 PSF 获取;(c)多光谱成像;(d)成像合成恢复^[70]

Fig. 10 Schematic of single-shot multispectral imaging with monochromatic camera. (a) Light from multispectral object propagating through strongly scattering medium generates speckle pattern on monochromatic camera; (b) multispectral PSF acquired by single pinhole illuminated by light with different spectral bands; (c) multispectral imaging; (d) image synthesis recovery^[70]

此外,散射介质光谱的光谱相关行为可以描述为散斑图案的解自相关效应,并表示为 $F_{PSA_1} * F_{PSA_2} = \delta_{\lambda_1 \lambda_2}$ 。Sahoo 等^[70]提出使用单色相机的多光谱成像技术。如图 10 所示,通过用不同窄带光谱照射的针孔获取连续多个光谱的点扩展函数。通过单色散斑与光谱点扩展函数相关来重建具有不同光谱带的图像,并合成所有光谱图像来获得全光谱图像。

在 Sahoo 的理论基础上,Xu 等^[71]发现不同光谱带的散斑仍然会存在一种特殊的相关性,这种相关性与文献[58]相似,只要对不同频谱的点扩展函数进行适当的空间缩放。他们进行了复杂的理论计算,得到了新的缩放因子 m 和最佳的相关性

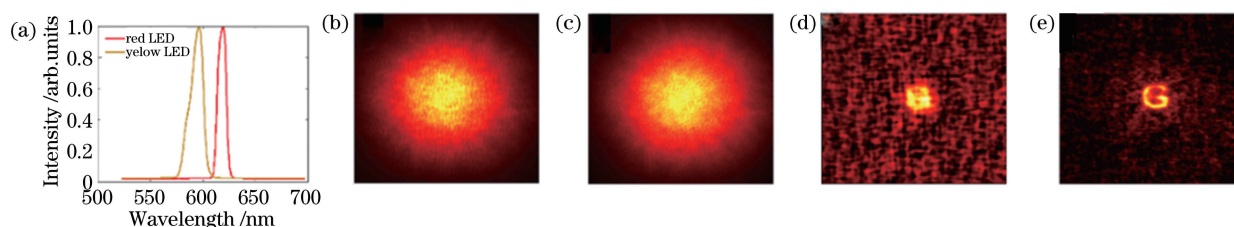


图 11 不同光谱 PSF 的关联。(a)参考光源与测试光源两个 LED 光源通过相应滤色片的光谱(完全没有重叠);
(b)(c)两个物体的散斑,其中中间的物体是已知的;(d)(e)直接恢复和通过点扩展函数调整恢复的成像^[71]

Fig. 11 Correlation of PSF with different spectra. (a) Spectra of two LED sources, which are reference and tested sources, passing through corresponding filters (no overlap at all); (b)(c) speckle patterns of two LED sources, where object in middle is known; (d)(e) directly recovered image and recovered image after PSF adjustment^[71]

$C(\lambda_1/\lambda_2, m) = \int F_{\text{PSA}_1}(mx, my) F_{\text{PSA}_2}(x, y) dx dy$ 。因此, λ_2 的点扩展函数可以通过空间重新缩放 λ_1 的点扩展函数来近似推导。如图 11 所示, 两种 LED 的光谱完全不重叠, 然而中间点扩展函数已知, 可以通过缩放估计出外围波长的点扩展函数并恢复出外围物体的形状。实验和理论结果表明: 对于薄散射介质, 波长导致的点扩展尺寸变换与景深变换导致的点扩展函数缩放强烈相关。当已知物和未知物采用不同颜色照明时, 可以通过单次拍照就可实现未知物的恢复。在此基础上, 采用波长补偿的深度分辨^[72]自动聚焦成像的恢复和超大景深的深度分辨成像的恢复都能被实现^[73]。

5 结束语

光学记忆效应使得散射成像系统在一定范围内是线性移位不变的。如果系统的点扩展函数可以获得, 则解卷积可以实现散射介质后的成像恢复。解卷积方法简单灵活, 可以与很多技术相结合, 具有广阔的发展空间, 同时解卷积方法通常可以得到很好的成像恢复质量, 能分析出更多的散斑细节和特殊关联, 有利于散斑物理机理的探索和更多信息的获取, 为更厚散射介质和更多变环境的成像提供新的技术手段。当不可以植入物点时, 可以通过已知参考物或评估点扩展函数的方法, 求得散射系统的点扩展函数, 从而进行非侵入式检测应用。

光场的全要素探索是刚开始发展的全新研究方向, 目前研究最多的就是散斑的光谱相关性, 当散斑光谱无重叠时, 散斑的相关性几乎降为零, 但是这种相关性可以通过散斑的缩放重新建立^[74]。散射过程中更丰富的物理信息的获取、分析和应用将是散射光学成像领域最重要的研究方向。

尽管解卷积散射成像技术的研究和应用取得了很大进展, 但仍有一些问题需要解决。例如: 随着散

射介质的厚度变大, 记忆效应范围将急剧下降, 这可能会导致解卷积方法的失败, 当散射介质的厚度大于几十个平均自由程时, 解卷积方法的解决方案仍然是一个挑战, 同时平移记忆效应还没被很好地应用起来; 其次, 如何加快解卷积运算过程以适应更高速的动态散射环境仍是一个难题; 最后, 除了空间和光谱特性之外, 光场全要素信息例如偏振、相位等的探测、分析和应用仍然未被实现。要解决这些问题, 需结合多参量光场调控手段、新物理量的探测和计算机技术人工智能等, 重新深入研究散射成像的物理模型。

致谢 感谢中山大学光电材料与技术国家重点实验室。

参 考 文 献

- [1] Bashkatov A N, Genina E A, Tuchin V V. Optical properties of skin, subcutaneous, and muscle tissues: a review [J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2011, 4(1): 9-38.
- [2] Wiersma D S. Disordered photonics [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 188-196.
- [3] Mosk A P, Lagendijk A, Lerosey G, et al. Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(5): 283-292.
- [4] Bifano T. MEMS deformable mirrors [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(1): 21-23.
- [5] Hong P L, Ojambati O S, Lagendijk A, et al. Three-dimensional spatially resolved optical energy density enhanced by wavefront shaping [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 844-849.
- [6] He H X, Guan Y F, Zhou J Y. Image restoration through thin turbid layers by correlation with a known object [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12539-12545.

- [7] He H X, Wong K S. An improved wavefront determination method based on phase conjugation for imaging through thin scattering medium[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(8): 085604.
- [8] Wang F J, He H X, Zhuang H C, et al. Controlled light field concentration through turbid biological membrane for phototherapy[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(6): 2237-2245.
- [9] Wang K, Sun W Z, Richie C T, et al. Direct wavefront sensing for high-resolution *in vivo* imaging in scattering tissue [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7276.
- [10] Huang D, Swanson E, Lin C, et al. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [11] Velten A, Willwacher T, Gupta O, et al. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 745.
- [12] Satat G, Heshmat B, Raviv D, et al. All photons imaging through volumetric scattering[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33946.
- [13] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, et al. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(2): 110-115.
- [14] Ma C, Xu X, Liu Y, et al. Time-reversed adapted-perturbation (TRAP) optical focusing onto dynamic objects inside scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 931-936.
- [15] Yang J M, Li J W, He S L, et al. Angular-spectrum modeling of focusing light inside scattering media by optical phase conjugation[J]. *Optica*, 2019, 6(3): 250-256.
- [16] Qiao M, Liu H L, Han S S. Bidirectional image transmission through physically thick scattering media using digital optical phase conjugation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 33066-33079.
- [17] Yu Y W, Sun C C, Liu X C, et al. Continuous amplified digital optical phase conjugator for focusing through thick, heavy scattering medium [J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(3): 703-714.
- [18] Wang Y M, Judkewitz B, DiMarzio C A, et al. Deep-tissue focal fluorescence imaging with digitally time-reversed ultrasound-encoded light [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 928.
- [19] Zhao L Y, Yang M, Jiang Y X, et al. Optical fluence compensation for handheld photoacoustic probe: an *in vivo* human study case[J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2017, 10(4): 1740002.
- [20] Baek Y S, Lee K R, Park Y K. High-resolution holographic microscopy exploiting speckle-correlation scattering matrix [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(2): 024053.
- [21] Zhuang B, Xu C F, Geng Y, et al. An early study on imaging 3D objects hidden behind highly scattering media: a round-trip optical transmission matrix method[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(7): 1036.
- [22] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 100601.
- [23] Popoff S, Lerosey G, Fink M, et al. Image transmission through an opaque material[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 81.
- [24] Li S P, Zhong J G. Dynamic imaging through turbid media based on digital holography[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31(3): 480-486.
- [25] Singh A K, Naik D N, Pedrini G, et al. Looking through a diffuser and around an opaque surface: a holographic approach[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7694-7701.
- [26] Harm W, Roider C, Jesacher A, et al. Lensless imaging through thin diffusive media [J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 22146-22156.
- [27] Freund I. Looking through walls and around corners [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 1990, 168(1): 49-65.
- [28] Newman J A, Webb K J. Imaging optical fields through heavily scattering media[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(26): 263903.
- [29] Stern G, Katz O. Noninvasive focusing through scattering layers using speckle correlations [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 143-146.
- [30] Li Y Z, Xue Y J, Tian L. Deep speckle correlation: a deep learning approach toward scalable imaging through scattering media[J]. *Optica*, 2018, 5(10): 1181-1190.
- [31] Cua M, Zhou E H, Yang C. Imaging moving targets through scattering media[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3935-3945.
- [32] Wu T F, Katz O, Shao X P, et al. Single-shot diffraction-limited imaging through scattering layers via bispectrum analysis[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5003-5006.
- [33] Shi Y Y, Liu Y W, Wang J M, et al. Non-invasive depth-resolved imaging through scattering layers via speckle correlations and parallax[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(23): 231101.
- [34] Edrei E, Scarcelli G. Optical imaging through

- dynamic turbid media using the Fourier-domain shower-curtain effect[J]. *Optica*, 2016, 3(1): 71-74.
- [35] Takasaki K T, Fleischer J W. Phase-space measurement for depth-resolved memory-effect imaging[J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31426-31433.
- [36] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- [37] Katz O, Heidmann P, Fink M, et al. Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners via speckle correlations[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(10): 784-790.
- [38] Antipa N, Kuo G, Heckel R, et al. DiffuserCam: lensless single-exposure 3D imaging [J]. *Optica*, 2018, 5(1): 1-9.
- [39] Valent E, Silberberg Y. Scatterer recognition via analysis of speckle patterns[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 204-207.
- [40] Saunders C, Murray-Bruce J, Goyal V K. Computational periscopy with an ordinary digital camera[J]. *Nature*, 2019, 565(7740): 472-475.
- [41] Idell P S, Fienup J R, Goodman R S. Image synthesis from nonimaged laser-speckle patterns[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(11): 858-860.
- [42] Voelz D G, Gonglewski J D, Idell P S. Image synthesis from nonimaged laser-speckle patterns: comparison of theory, computer simulation, and laboratory results [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(23): 3333-3344.
- [43] Zhuang H C, He H X, Xie X S, et al. High speed color imaging through scattering media with a large field of view[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32696.
- [44] Edrei E, Scarcelli G. Memory-effect based deconvolution microscopy for super-resolution imaging through scattering media [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33558.
- [45] Feng S C, Kane C, Lee P A, et al. Correlations and fluctuations of coherent wave transmission through disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(7): 834-837.
- [46] Freund I, Rosenbluh M, Feng S C. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(20): 2328-2331.
- [47] He H X. Imaging restoration from the scattering light by wavefront shaping technique [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2014: 30-31. 和河向. 波前调制技术在散射光成像恢复中的应用 [D]. 广州: 中山大学, 2014: 30-31.
- [48] Judkewitz B, Horstmeyer R, Vellekoop I M, et al. Translation correlations in anisotropically scattering media[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(8): 684-689.
- [49] Bertolotti J. Unravelling the tangle [J]. *Nature Physics*, 2015, 11(8): 622-623.
- [50] Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(1): 55-59.
- [51] Lucy L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions [J]. *The Astronomical Journal*, 1974, 79(6): 745-754.
- [52] Fan J Q, Koo J Y. Wavelet deconvolution[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 48(3): 734-747.
- [53] Neelamani R, Choi H, Baraniuk R. ForWaRD: Fourier-wavelet regularized deconvolution for ill-conditioned systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(2): 418-433.
- [54] Xie X S, Chen Y Z, Yang K, et al. Harnessing the point-spread function for high-resolution far-field optical microscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(26): 263901.
- [55] Li L, Li Q, Sun S, et al. Imaging through scattering layers exceeding memory effect range with spatial-correlation-achieved point-spread-function[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1670-1673.
- [56] Tang D L, Sahoo S K, Tran V, et al. Single-shot large field of view imaging with scattering media by spatial demultiplexing[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7533-7538.
- [57] Liao M H, Lu D J, Pedrini G, et al. Extending the depth-of-field of imaging systems with a scattering diffuser[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 7165.
- [58] Xie X S, Zhuang H C, He H X, et al. Extended depth-resolved imaging through a thin scattering medium with PSF manipulation [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4585.
- [59] Goodman J W. *Speckle phenomena in optics: theory and applications* [M]. USA: Roberts and Company Publishers, 2007: 75-77.
- [60] Chen Q Q, He H X, Xu X Q, et al. Memory effect based filter to improve imaging quality through scattering layers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 6901010.
- [61] Xu X Q, Xie X S, He H X, et al. Imaging objects through scattering layers and around corners by retrieval of the scattered point spread function [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32829-32840.
- [62] Yang W Q, Li G W, Guohai S T. Imaging through scattering media with the auxiliary of a known reference object [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8:

- 9614.
- [63] Yang X J, Xiang L Z. Photoacoustic imaging of prostate cancer [J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2017, 10(4): 1730008.
- [64] Wróbel M S, Popov A P, Bykov A V, et al. Multi-layered tissue head phantoms for noninvasive optical diagnostics[J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2015, 8(3): 1541005.
- [65] Crosignani V, Jahid S, Dvornikov A, et al. Deep tissue imaging by enhanced photon collection [J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2014, 7(5): 1450034.
- [66] Wang Z P, Jin X, Dai Q H. Non-invasive imaging through strongly scattering media based on speckle pattern estimation and deconvolution [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 9088.
- [67] Wu T F, Dong J, Shao X P, et al. Imaging through a thin scattering layer and jointly retrieving the point-spread-function using phase-diversity [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27182-27194.
- [68] Han P L, Liu F, Yang K, et al. Active underwater descattering and image recovery[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(23): 6631-6638.
- [69] Li X H, Greenberg J A, Gehm M E. Single-shot multispectral imaging through a thin scatterer [J]. *Optica*, 2019, 6(7): 864-871.
- [70] Sahoo S K, Tang D L, Dang C. Single-shot multispectral imaging with a monochromatic camera [J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1209-1213.
- [71] Xu X Q, Xie X S, Thendiyammal A, et al. Imaging of objects through a thin scattering layer using a spectrally and spatially separated reference [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15073-15083.
- [72] Liang J B, Cai J F, Xie J P, et al. Depth-resolved and auto-focus imaging through scattering layer with wavelength compensation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(6): 944-949.
- [73] Xie J P, Xie X S, Gao Y M, et al. Depth detection capability and ultra-large depth of field in imaging through a thin scattering layer[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(8): 085606.
- [74] He H X, Xie X S, Liu Y K, et al. Exploiting the point spread function for optical imaging through a scattering medium based on deconvolution method [J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2019, 12(4): 1930005.