

计算成像技术中的点扩散函数工程

乔敏达¹, 白林阁¹, 王书恒¹, 王天宇¹, 董雪^{1,2}, 相萌^{1,2}, 刘飞^{1,2}, 刘金鹏^{1,2}, 邵晓鹏^{1,2,3}

(1. 西安电子科技大学光电工程学院, 西安 710071; 2. 西安电子科技大学西安市计算成像重点实验室, 西安 710071; 3. 西安电子科技大学杭州研究院, 杭州 311231)

摘要: 围绕光学成像中点扩散函数(Point spread function, PSF)在计算成像中的新内涵与应用, 介绍了传统光学成像中PSF的概念以及PSF在光学系统设计中关键作用, 并简要说明了几种利用PSF恢复图像算法以及图像评价指标。在此基础上以计算成像框架下信息传递的视角重新审视了PSF的内涵, 从狭义、广义光学系统两个方面对计算成像领域中的相关研究进行了归纳总结, 最后展望了PSF工程技术的应用前景及发展趋势。

关键词: 点扩散函数; 计算成像; 成像系统; 计算复原; 图像处理

中图分类号: TN29

文献标志码: A

Point Spread Function Engineering in Computational Imaging Technology

QIAO Minda¹, BAI Linge¹, WANG Shuheng¹, WANG Tianyu¹, DONG Xue^{1,2},

XIANG Meng^{1,2}, LIU Fei^{1,2}, LIU Jinpeng^{1,2}, SHAO Xiaopeng^{1,2,3}

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Computational Imaging, Xidian University, Xi'an 710071, China; 3. Hangzhou Institute of Technology, Xidian University, Hangzhou 311231, China)

Abstract: This paper focuses on the new connotation and application of point spread function (PSF) of optical imaging in computational imaging. Firstly, the conception of PSF in traditional optical imaging and the key role of PSF in optical system design are introduced, and several algorithms for imaging restoration using PSF and imaging evaluation indices are briefly explained. On this basis, the connotation of PSF is re-examined from the perspective of information transfer under the framework of computational imaging, and relevant researches in the field of computational imaging are summarized from the two aspects of narrow and generalized optical systems. Finally, the application prospect and development trend of PSF engineering technology are prospected.

Key words: point spread function; computational imaging; imaging system; computational restoration; image processing

引言

完备的光学成像链路包含目标、传输介质、光学系统以及探测器, 最终的成像结果综合了成像环

境、系统像差、探测器电路以及后处理算法等因素的影响。例如成像时,大气或水体等散射介质造成的能量衰减会使得成像质量退化;光学系统中,受光学器件面型加工精度与成像口径的限制^[1],成像结果总会面临像差、高频截止等负面影响;此外对于成像探测器,像素尺寸、间隔和感光材质等因素会影响成像的分辨率、信号的采样密度和图像的信噪比。为了全面描述成像过程中的影响因素,点扩散函数(Point spread function, PSF)被引入用于综合描述成像的整体过程。

在基本概念上,PSF与冲激响应相近,是在不同研究领域下提出的。在通信领域,单位冲激函数表示一个幅值无限大、持续时间非常短暂的信号。当系统输入为一个冲激函数时,系统所产生的输出响应为冲激响应,它描述了传输信道对脉冲信号的影响,通常以时域或频域的形式表示。与冲激响应相似,PSF在光学领域是指目标处的点光源在成像面处产生的响应,其可以描述整个光学系统对点光源的解析能力。理想情况下,物方点光源对应在像方应该会形成完美的像点;但由于成像系统口径有限等因素,实际在像方往往会形成一个弥散斑;如果在成像光路中引入散射介质,则在像方会形成无明显序列的散斑分布。常见成像场景如图1所示^[2],其中图1(a)为理想成像,图1(b)为低阶像差成像,图1(c)为透过散射介质成像。

PSF是对光学成像过程的一种表征,如果将光学成像过程称之为“黑箱”,那么PSF无疑是打开“黑箱”的“密钥”。在传统光学成像中,基于像差驱动的设计流程旨在得到优化后的PSF。

PSF根据成像区域、景深以及探测元尺寸等因素进行设计,从而获得质量更高的成像效果^[3]。随着近年来计算成像技术的迅猛发展,其主要思想是利用前端光学成像系统设计联合后端图像复原算法的全局设计方式,以较高的算法复杂度换取高质量的图像结果。金飞等^[4]利用维纳滤波算法去除采集图像过程中产生的运动模糊。Li等^[5]利用PSF进行全局优化,简化光学系统从而降低制作成本,在实现光学系统轻量化的同时,提高成像质量。Zheng等^[6]根据图像匹配算法,在获得光学系统窄带PSF的基础上,模拟出宽谱的PSF,提升图像恢复质量。Opatovski等^[7]提出基于望远镜复杂光学系统结合PSF工程的方法,解决了单目千米级的被动测距。Ascenso等^[8]利用自适应光学系统结合重建PSF来提高测量精度,实现对天体的高分辨成像。

1 计算成像中PSF工程理论

1.1 传统光学成像中的PSF工程

在传统光学成像中,基于系统线性不变性且只考虑加性噪声的情况下,成像过程可以表示为

$$I(x, y) = F(x, y) \cdot T[O(x, y)] + N(x, y) \quad (1)$$

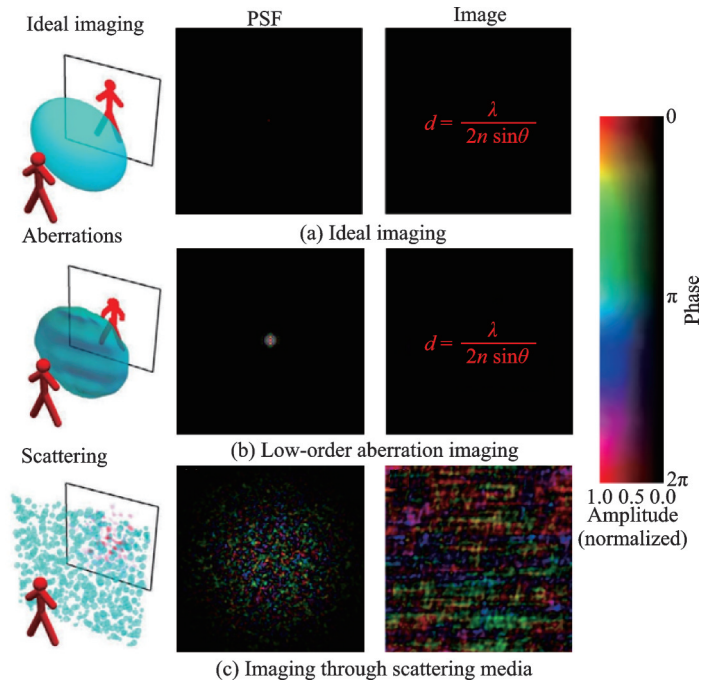


图1 常见成像场景^[2]

Fig.1 Common imaging scenes^[2]

式中: $I(x, y)$ 表示成像面探测结果; $O(x, y)$ 表示物面目标; T 表示信息传递因子; $F(x, y)$ 表示光学系统中存在的渐晕区对PSF线性范围的限制作用,即在规定范围内测得任何点的PSF之间都是满足高相关性的; $N(x, y)$ 表示加性噪声。若将信息传递因子表示成一系列点源的响应形式,即PSF形式,式(1)则可表征为

$$I(x, y) = F(x, y) \cdot \iint \text{PSF}(x, y) O(x, y) dx dy + N(x, y) \quad (2)$$

式中 $\text{PSF}(x, y)$ 表示物面处的点光源经过成像系统在成像面处产生的响应。一般在PSF工程中,光学成像都会在渐晕区内进行研究,则式(2)光学成像表达式可以用卷积的形式来进行简化

$$I(x, y) = \text{PSF}(x, y) * O(x, y) + N(x, y) \quad (3)$$

式中“*”表示卷积算子,因此PSF在图像处理领域也往往被称为卷积核。对含有卷积表达式的计算,可以在傅里叶频谱域进行分析,从而大大降低算法复杂度,即

$$i(u, v) = \text{psf}(u, v) \cdot o(u, v) + n(u, v) \quad (4)$$

式中: $i(u, v)$ 、 $\text{psf}(u, v)$ 、 $o(u, v)$ 与 $n(u, v)$ 分别表示为 $I(x, y)$ 、 $\text{PSF}(x, y)$ 、 $O(x, y)$ 、 $N(x, y)$ 的傅里叶变换。传统光学成像PSF卷积模型如图2所示。

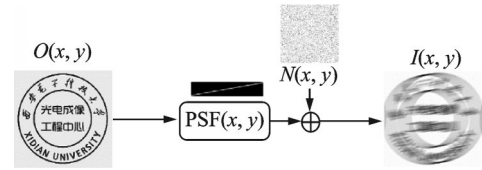


图2 传统光学成像PSF卷积模型

Fig.2 Traditional optical imaging PSF convolution model

人们往往会对PSF进行局部或者全局优化,其目的是为了得到理想情况下的脉冲响应,从而提高成像质量。Hubing等^[9]利用PSF得到调制传递函数(Modulation transfer function, MTF),之后对MTF进行优化从而对光学系统进行设计。Krist^[10]仿真估计PSF来复原提高哈勃望远镜捕获的模糊像。通过对PSF进行优化设计,可以更好地优化和改进光学系统的性能,从而为各种应用提供更高质量的成像。这些研究对于光学成像领域的进步具有重要意义,为设计更优秀的光学系统提供了理论基础和实践指导。

1.2 PSF求逆算法及图像评价标准

在图像处理领域中,恢复因模糊和噪声而退化的图像是一项至关重要的任务。根据图像的退化模型,讨论PSF的求逆算法及其在图像复原中的应用。此外,本文还将介绍客观评价图像复原质量的标准,包括峰值信噪比(Peak signal-to-noise ratio, PSNR)和结构相似性指数(Structure similarity index measure, SSIM),为评估图像处理效果提供科学依据。

维纳滤波假定线性滤波器的输入为有用信号和噪声之和,两者均为广义平稳过程,若知道它们的二阶统计特性,根据最小均方误差准则(滤波器的输出信号与需要信号之差的均方值最小),则能够求得最佳线性滤波器的参数。维纳滤波建立在最小化统计准则的基础上,它所得的结果只是平均意义上的最优。

最小二乘问题可看成是使形式为 $\|Q\hat{O}\|^2$ 的函数服从约束条件 $\|I - \text{PSF}\hat{O}\|^2 = \|N\|^2$ 的最小化问题,其中 I 表示成像面探测结果, Q 为对 O 的线性算子, \hat{O} 表示 O 的一个估计值,也就是说,在约束条件 $\|I - \text{PSF}\hat{O}\|^2 = \|N\|^2$ 下求 $Q\hat{O}$ 的最小化而得到 O 的最佳估计^[4], N 表示加性噪声,即

$$o(u, v) = \left[\frac{1}{\text{psf}(u, v)} \frac{|\text{psf}(u, v)|^2}{|\text{psf}(u, v)|^2 + s \cdot \frac{P_n(u, v)}{P_o(u, v)}} \right] i(u, v) \quad (5)$$

式(5)为维纳滤波的一般表达形式,方括号中的项通常称为维纳滤波器或最小均方误差滤波器。其中: $i(u, v)$ 为退化图像的傅里叶变换; $\text{psf}(u, v)$ 为退化函数的傅里叶变换; $|\text{psf}(u, v)|^2 = \text{psf}^*(u, v) \cdot \text{psf}(u, v)$, $\text{psf}^*(u, v)$ 为退化函数的傅里叶变换的复共轭; $P_n(u, v) = |n(u, v)|^2$ 为噪声的功率谱; $P_o(u, v) = |o(u, v)|^2$ 为原始图像的功率谱; $s = \frac{1}{\lambda}$, λ 是一常数,为拉格朗日乘数。

Lucy-Richardson算法采用迭代方法恢复图像,能够按泊松噪声统计标准求出与给定点扩散函数卷积后最有可能成为采集图像的原始图像^[11]。对重建图像的第 $(r+1)$ 次估计为第 r 次估计图像与1个校正图像的乘积^[12],即

$$O_{i,j,r+1} = O_{i,j,r} \sum_{m=i}^e \sum_{n=j}^f \frac{I_{m,n} \text{PSF}_{m-i+1,n-j+1}}{\sum_{p=a}^b \sum_{q=e}^d O_{p,q,r} \text{PSF}_{m-p+1,n-q+1}} \quad (6)$$

式中首次估计为

$$O_{i,j,1} = \sum_{m=i}^e \sum_{n=j}^f \frac{I_{m,n} \text{PSF}_{m-i+1,n-j+1}}{\sum_{p=a}^b \sum_{q=e}^d \text{PSF}_{m-p+1,n-q+1}} \quad (7)$$

式(6,7)中

$$\begin{cases} a = \max(1, m - K + 1); b = \min(m, I) \\ c = \max(1, n - L + 1); d = \min(n, J) \\ e = i + K - 1; f = j + L - 1 \\ i = 1, 2, 3, \dots, I; j = 1, 2, 3, \dots, J \end{cases} \quad (8)$$

式中: I, J 和 K, L 分别表示 $O(x, y)$ 和 $\text{PSF}(x, y)$ 按照相应的间隔取样,产生相应的 $I \times J$ 和 $K \times L$ 的矩阵。

实际上, Lucy-Richardson算法的迭代过程可以近似认为是一个迭代解卷积的过程。逆滤波^[13-14]又称为方向滤波,是一种非约束复原的算法,在无噪声的情况下,图像退化模型的频域形式可表示为式(4)。对式(4)进行傅里叶逆变换可得到原始图像为

$$O(x, y) = F^{-1}(o(u, v)) = F^{-1} \left\{ \frac{i(u, v)}{\text{psf}(u, v)} \right\} \quad (9)$$

式中 $F^{-1}\{\cdot\}$ 表示傅里叶逆变换。

上述便是逆滤波算法的基本原理。逆滤波的优点是计算比较简单,缺点是当 u, v 平面上存在一些使得 $\text{psf}(u, v)$ 为0或者接近于0的区域时, $o(u, v)$ 在这些区域附近会发生剧烈变化,且噪声项会被放大。

客观评价图像复原的质量,一般会引入PSNR和SSIM两种客观评价指标。PSNR和SSIM的值越大,表明图像的保真度越高。PSNR是根据图像对应像素点间的误差来进行图像质量评价,定义为

$$P_{\text{PSNR}} = 10 \lg \left(\frac{255^2}{M_{\text{MSE}}} \right) \quad (10)$$

$$M_{\text{MSE}} = \frac{1}{MN} \sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N (J(x, y) - \hat{J}(x, y))^2 \quad (11)$$

式中: M_{MSE} 表示两幅图像间的均方误差; $J(x, y)$ 和 $\hat{J}(x, y)$ 分别为图像复原前后在像素点 (x, y) 处的灰度值; M, N 分别为图像长度与宽度。

SSIM从亮度、对比度和结构3方面度量图像间的相似性,相比PSNR等传统图像质量评价指标,SSIM更加符合人眼对图像的视觉感知。SSIM的取值范围为 $-1\sim 1$,定义为

$$\text{SSIM}(a, b) = \frac{(2\mu_a\mu_b + C_1)(2\sigma_{ab} + C_2)}{(\mu_a^2 + \mu_b^2 + C_1)(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + C_2)} \quad (12)$$

式中: a, b 为输入图像; μ 为图像的均值; σ 为图像的标准差; σ_{ij} 为两幅图像的协方差; $C_1 = (K_1L)^2$, $C_2 = (K_2L)^2$ 为常数,其中 K_1 和 K_2 是为了维护稳定性设置的两个很小的常数, L 为像素值的范围。

1.3 计算成像中的PSF工程

传统成像由于受到系统孔径的限制及光学像差的影响,难以实现对远距离目标精细结构的清晰成像。此外,复杂的光照条件也制约着传统成像在不同场景下的实际应用。同时,在传统成像过程中,PSF虽然能够传递强度信息,却丢失了相位、偏振等光场的多维度信息,这已经无法在新型成像需求下实现对目标特征的完备表征。简而言之,传统成像方法存在技术和理论上的局限,难以满足现代对图像质量、信息获取及环境适应等方面的需求,因此需要进一步发展和改进新的成像技术。

近年来,随着具有全局处理能力的计算成像技术的快速发展,众多传统成像无法解决的问题已经可以迎刃而解。计算成像技术是对传统成像领域进行的一次大革新,从而引领光电成像从工业化时代走向信息化时代^[15]。有别于传统成像“所见即所得”,其将光学、数学和信息处理等学科进行交叉互补,利用算法的复杂度换取成像质量的提高,将信息传递贯穿于整个成像链路,进而实现高分辨率的成像。计算成像技术打破了传统光学成像仅对光场强度利用的壁垒,其对光场信息的多个维度都有所利用,因此计算成像技术中的PSF可以构建目标原始信息与特征物理量的映射,获取到目标空间维度、光谱和偏振等多维特性信息,实现成像系统全局链路信息传递的功能。通过对光场PSF进行不同维度的调制采集,逆计算出目标光场的本征信息,从而使得计算成像技术可以达到传统成像无法企及的信息利用率和解译度。

本文针对不同类型的成像技术应用,将现有的PSF计算光学成像分为狭义上具备传统光学成像系统应用以及凡是能够实现成像探测的广义上的光学系统应用。狭义上,例如具备透镜的简化光学系统成像技术、实时误差校正的自适应光学成像技术以及模糊图像复原的去卷积成像技术;广义上,例如成像透镜外存在光学介质的透散射成像技术、以掩膜代替透镜作用的无透镜成像技术、通过编码相位掩膜提高信息容量的全息成像技术以及利用算法与相位调制的计算光学成像的协同设计。

2 狭义光学成像系统下的计算成像PSF工程应用

传统光学成像系统是建立在几何光学的基础上,利用光学元件(如透镜、反射镜等)对光线进行控制和处理,从而在特定平面产生目标物的图像,光场信息的获取是对三维空间的二维强度记录,与人眼视觉相似,通常不涉及复杂的光场解译过程。其目的是为了获得可满足人眼或者机器视觉要求的图像,所以在进行图像采集时就需要保证获取高质量的图像数据。然而,在实际应用场景中,多种因素常使得成像效果未能达到预期的效果,此时便需依赖数字图像处理技术对采集的图像进行进一步的优化处理。在此过程中,光学成像过程与数字图像处理是独立且串行的关系,算法通常被视作是一种后期处理手段,并不纳入成像系统设计的考虑之中,这决定了传统成像技术无法从根本上通过信息处理技术来挖掘场景更深层次的信息。简言之,如果成像前端所获取的图像数据存在缺失或者质量不理想(如严重离焦、噪声污染)的情况,单纯依赖图像处理技术在后端难以实现有效补偿。在计算成像领域,PSF是一种关键工具,它不仅能帮助研究者理解光学系统如何影响图像质量,而且还是优化和改进成像技术的基础。在图像恢复和重建方面,PSF允许通过去卷积等技术处理模糊图像,恢复细节并提高

分辨率。此外,PSF还在超分辨率成像、系统设计和性能评估中发挥作用,使研究人员能够在不同应用中实现更清晰、更精确的成像结果。因此,PSF在计算成像中不仅是理解光学系统性能的关键,也是提升成像技术和图像质量的重要手段。目前,通过简化光学系统、自适应光学、模糊或降质图像的复原等技术一定程度上解决了系统复杂、大气扰动干扰和成像模糊等传统成像难题。

2.1 面向简化光学系统的应用

计算成像技术通过将光学设计与计算消像差相结合的方法来获取高像质图像,其明显优势在于能够用简单的光学系统获取像质与复杂镜头相媲美的图像,达到了精简镜头结构、降低成本的目的^[16]。

简单透镜成像技术的核心是用计算复原方法来实现图像质量的提升,具体来说是将图像退化过程进行数学建模,并采用一个逆过程进行处理,以便复原出接近原始状态的高质量图像,如图3所示^[17]。

Heide等^[18]提出了单透镜计算成像的概念,即在通过后端计算成像技术的应用来补偿光学系统中的像差影响,进一步优化光学系统,实现光学设备的轻量化与成本降低。针对单透镜系统色散严重的问题,他们提出了交叉通道先验去卷积算法,该算法提出“物体的边缘会出现在红、绿、蓝3个颜色通道相同的位置”的先验,利用聚焦理想的颜色通道所接收的锐利图像,帮助另外两个严重离焦通道所接收的模糊图像复原,明显提升单透镜相机的复原图像质量,如图4所示^[18]。

Li等^[19]制作了一台单透镜相机,其采用 l_1/l_2 稀疏先验估计了单透镜相机空间变化的PSF,再使用结合超拉普拉斯先验的快速图像非盲去卷积算法复原了模糊图像。崔金林^[20]采用稀疏字典方法,提高了获取光学系统点扩散函数的速度和准确程度,使单透镜相机的图像复原质量大幅提高。Li等^[21]还用了一个由两片镜组成的简单光学系统代替了单透镜,该系统能够较好地矫正其复原算法所难以处理的色差,同时两片镜系统可以更好地控制PSF的大小,减少了图像复原结果的振铃效应。

为进一步提高单透镜成像系统的图像复原精度,可以通过标定之类的方法估计出简单透镜成像系统PSF,然后基于所估计的PSF,通过采用非盲卷积图像复原方法实现清晰图像的重建。通过非盲卷积方法估计简单透镜成像系统的PSF,需要得到简单透镜拍摄的模糊图像,以及与该模糊图像精准匹配的参考图像。Heide等^[18]利用单反相机的快门光圈特点,将极小光圈获取的图像作为潜在清晰图像,并将其与正常光圈下拍得的模糊图像相结合,运用非盲卷积方法估计出简单透镜成像系统对应的PSF。Schuler等^[22]则在精密的暗室中,利用小孔成像的原理,直接获取简单透镜成像系统的PSF。Trimeche等^[23]尝试采用棋盘格图像作为标定基准,以获得用于标定的清晰图像和模糊图像对,然后根据清晰和模糊图像对估计PSF。Joshi等^[24]则提出了一种通过预测模糊输入图像,从单个图像中以亚像素分辨率估计非参数的、空间变化的PSF。在大视场的光学系统设计中,倍率色差通常是最难校正的像差,需要使用昂贵的光学材料对其进行校正,郑云达^[25]利用空间变化的交叉通道图像复原算法,能够有效去除光学系统的倍率色差,并可以利用某一锐利的颜色通过所接收的清晰图像进行去卷积计算,明显降低图像的模糊,实现高质量图像恢复。并且采用多重结构方法放宽了色彩通道成像位置的统一

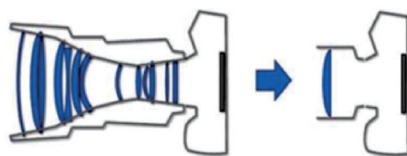


图3 简单透镜计算成像替代复杂光学镜头^[17]

Fig.3 Simple lenses for computational imaging instead of complex optical lenses^[17]



图4 Heide自制单透镜相机拍摄的模糊图与复原结果对比^[18]

Fig.4 Comparison of taken blurred image and restored result by Heide's self-made single lens camera^[18]

约束,在每个通道中优化的波长由探测器光谱敏感度决定,并按各波长相应的光谱敏感度进行加权,以约束各颜色通道宽光谱PSF的尺寸。

光学系统的垂轴放大率与焦距成正比^[26]。在需要远距离拍摄而又希望获取较大轴向放大率的场合,通常需使用长焦距镜头,但这类镜头一般尺寸太大,给使用带来极大的不便。基于简化光学系统的计算成像技术能够将一部分残余像差交由数字图像系统校正,减轻了前端光学系统的设计约束,有助于减少系统总长。

2.2 面向自适应光学的应用

自适应光学技术通过波前传感器实时测量监测波前误差,并精准调控波前校正器,从而实现补偿波前误差,显著提高像质。然而,传统意义上的自适应光学系统较为复杂且成本昂贵。为了降低系统的复杂性和成本,可以直接利用波前传感器实时获取波前相位信息,并通过解卷积处理对畸变的光斑进行补偿。该方式的自适应光学系统简化了校正模块,因此具有更简洁的架构和控制系统,同时保持了良好的实时性和自适应性。虽然近年自适应光学的波前补偿技术得到了快速发展,图像解卷积仍然是其图像后处理中的关键环节。由于受计算机处理能力、波前测量数据误差以及噪声等因素影响,自适应光学对大气湍流的补偿或校正只能部分实现,目标的高频信息仍然受到严重的抑制和衰减^[27]。因此,这些经过初步校正的图像还需通过数字图像恢复技术进行进一步的后处理。

在天文观测领域,大气扰动导致的图像模糊问题尤为显著。大气扰动模糊由大气的非均匀性造成的折射率变化以致穿过的波前振幅和相位发生扰动所引起。由于其重要性,得到了诸如自适应光学、卫星图像和遥感成像等领域的关注^[28-30]。

对大气扰动模型的一种简化处理是将其视为线性系统,使得大气引起的模糊可以用一个线性移不变的PSF来描述。根据Kolmogorov扰动理论,大气扰动模糊的PSF是高斯型函数,其表达式为

$$h(x, y) = K \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

式中: K 为归一化常量,用来确保模糊的均一化; σ^2 表征模糊的严重程度。式(13)所对应的频域传递函数为

$$H(u, v) = \exp\left[-c(u^2 + v^2)^{5/6}\right] \quad (14)$$

式中 c 为一个依赖扰动类型的变量,可以通过试验来确定。幂5/6有时用1代替。

在遥感成像方面,PSF也可以被近似为

$$h(x, y) = (F^{-1}(Ae^{i\phi}))^2 \quad (15)$$

式中: A 为成像系统的孔径函数; ϕ 为相位分布,反映了大气扰动对波前的影响,可以通过测量远距离星点或者引导激光束的相位畸变来确定。

在自适应光学系统中,用于增强图像清晰度算法主要归纳为两大类:两步估计法和联合估计法。两步估计法首先利用波前传感器测量的数据来估计由大气湍流引起的波前误差,基于此数据构建大气与光学系统的PSF估计值,然后利用该PSF对观测得到的图像进行解卷积重建观测到的天体图像。相较之下,联合估计法则是同时进行目标函数和波前误差的估计,此方法观测得到的图像包含有波前相差信息,所以这种方法解决了单独使用波前传感器数据进行误差估计的局限。自适应光学系统中的波前传感器能够实时检测波前的变化,如斜率或曲率分布,利用这些信息,不仅可以重建成像时的PSF,还能够直接从质量下降的图像中估算出PSF。

尽管经过自适应光学校正的图像有所改善,但仍然受到残留模糊的污染,这极大地减少了精细图像细节的对比度。数字图像恢复技术为减轻由噪声和模糊导致的图像质量退化提供了有效手段,能显

著降低噪声并提升图像对比度。因此,想要获得最佳的图像必须同时进行硬件和软件校正^[31]。太阳表面图像复原效果如图5所示^[32]。

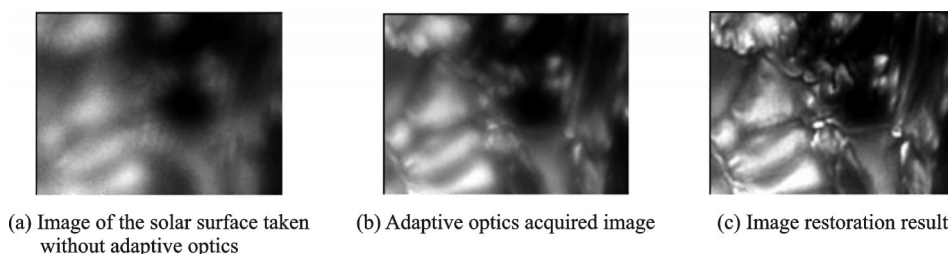


图5 太阳表面图像复原效果^[32]

Fig.5 Restoration effect of solar surface image^[32]

法国航空航天研究院针对天文观测中的自适应光学图像提出了基于目标与点扩散函数先验信息的联合最大后验概率估计方法^[33]、基于目标边界迭代保持的Myopic解卷积复原算法^[34]、严格先验约束条件的最大似然盲解卷积算法^[35]。美国空军Phillips实验室在理论推导与图像复原技术进行了深入研究并取得进展,曾先后实现了对自适应光学星体观测图像进行迭代盲解卷积(Iterative blind deconvolution, IBD)、Myopic解卷积等图像复原^[36]。解放军信息工程大学测绘学院开展了自适应光学天文观测图像高清晰复原相关理论模型与算法方面的研究,包括提出了动态支持域约束与改进代价函数解卷积、多重约束非对称图像迭代盲解卷积等复原算法,并通过实验进行了验证^[37-38]。中科院成都光电所对自适应光学天文观测图像采用基于单帧选择与多帧降质图像盲解卷积的事后处理方法,成功复原了接近衍射极限的天文观测图像^[39]。

2.3 图像复原去卷积

图像复原技术是通过某些已知的退化现象的先验知识对受损图像进行重建,以提升图像的质量。在图像处理领域中,图像复原方法的研究对图像处理领域具有重要的意义,同时其还具有十分广泛的应用价值,典型的应用体现在天文观测、地质探测、军事侦察、公安刑侦、生物认证和医疗图像分析等众多领域。形成模糊图像的过程可理解为清晰的场景通过与系统的PSF卷积并加入特定噪声后导致图像退化的过程,因此图像去模糊本质就是一个去卷积的过程^[18]。简单透镜成像的图像退化过程可以表达为式(3)。

李卫丽^[40]针对简单透镜成像系统,提出一种基于噪声图像的非盲卷积PSF估计方法,使用噪声图像来估计简单透镜成像系统的PSF,以获得适用于非盲去卷积恢复的模糊与清晰图像对。随着需要计算PSF的场景不断扩展,PSF强度分布的计算不再限于与坐标轴平行的二维平面(xy 、 xz 平面)。对于需要计算相对于坐标轴有倾角平面上的PSF强度分布的情况,可先计算一个包含该平面的三维PSF强度分布,再通过切片与插值方式将该倾斜平面的数据提取出来。为了解决该问题,Cai等^[41]对二维傅里叶变换算法进行了改进,对空间频率的坐标进行变换,使其能计算任意平面上的PSF强度分布,极大地提高了PSF计算的灵活性。

在大多数图像复原的场景中,为了便于解决问题通常假定光学系统的PSF是空间不变的,然而在实际成像过程中,由于像差、传输介质等因素的存在,系统的PSF通常表现为随空间变化。计算光学系统中考虑PSF的这种空间变化特性,并应用于光学模糊图像的恢复过程,能够有效地提高恢复图像的质量。

实际成像过程中,图像在空间各处的退化情况各不相同,主要是由于系统像差的存在、加工误差的影响以及外界环境的干扰,因此考虑将空间变化的PSF代替空间不变的PSF作为图像复原中的模糊核

函数,随视场变化的空间变化 PSF 图像退化过程表示为

$$I(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u, v) P(u, v, x - u, y - v) dx dy \quad (16)$$

式中 P 为空间变化的点扩散函数。

在针对成像系统空间变化的 PSF 进行图像恢复的研究中,Trussell 等^[42-43]首次提出图像复原中的分块复原思想,并有效复原了成像系统空间变化 PSF 的输出模糊图,该方法的核心在于合理划分 PSF 子块以及复原后各图像子块的无缝拼接。其中若子块数量较少,类似单一的 PSF 图像复原会导致 PSF 估计不准确,复原图像的像质并不理想,反之若子块数量太多,由于振铃效应导致图像细节信息较多的地方震荡较严重。振铃效应是在图像或信号处理过程中出现的一种常见问题,特别是在进行去模糊或锐化处理时。这种效应表现为目标边缘附近出现的一系列亮暗相间的波纹或者条纹,看起来像是被处理过的图像或信号“振动”了一样。在图像和 PSF 分块合适的情况下,各子块复原后的拼接处理也是非常关键的问题,拼接方式不同边界产生的振铃效应影响不同。

对于待估计空间变化 PSF 的某个模糊图像 x ,依次将其划分成 p 个不同区域相同大小的图像块,而且这 p 个图像块中相邻图像块的边缘部分有重叠。对于每个单独的图像块 r ($0 \leq r < p$),设置一个窗口函数 $w^{(r)}$,如果将图像 x 表示成列向量,则每个图像块对应的窗口函数 $w^{(r)}$ 与图像 x 所对应的列向量大小相同,并且在窗口函数 $w^{(r)}$ 这个列向量中,与图像块 r 对应的部分为非零值,其余部分均为零值。将窗口函数 $w^{(r)}$ 与其对应的图像块 r 逐像素相乘。将每个图像块 r 所对应的 PSF 分别定义为 $f^{(r)}$,并且 $f^{(r)}$ 长度为 k 。则图像 x 所对应的空间变换 PSF 可表示为

$$y_i = \sum_{r=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{k-1} f_j^{(r)} w_{i-j}^{(r)} x_{i-j} \quad 0 \leq i < m \quad (17)$$

式中图像 x 中像素点的个数用参数 m 表示。其中,窗口函数 $w^{(r)}$ 应该满足如下约束

$$\sum_{r=0}^{p-1} w_i^{(r)} = 1 \quad 0 \leq i \leq m \quad (18)$$

针对使用空间变化 PSF 恢复图像,除了常用的分块复原的方法,Josh 等^[44]提出了基于强边缘预测估计非参数的、空间变化的 PSF,得到空间变化 PSF 后采用传统的 Lucy-Richardson 算法对图像进行去卷积处理,可自动、快速地产生较准确的结果。Schuler 等^[45]利用高效滤波流(Efficient filter flow, EFF)法来缓解光学像差导致的图像模糊问题,通过将光学像差信息编码到空间变化 PSF 中,并在频域内进行图像的空间变化 PSF 计算,还在复原算法中引入超拉普拉斯先验以进一步优化图像复原过程,复原效果如图 6 所示。

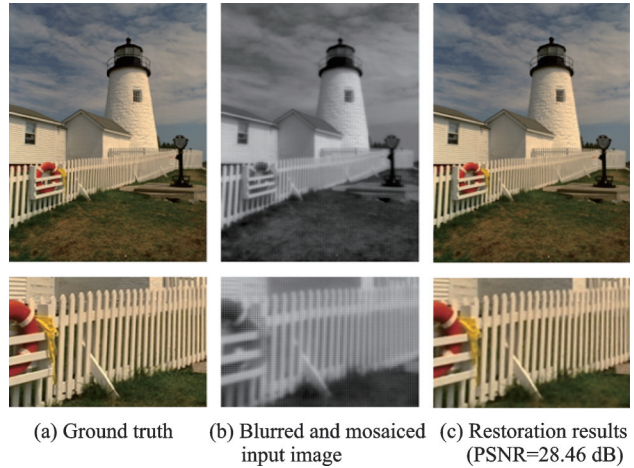


图 6 原始图像与复原效果对比图^[45]

Fig.6 Comparison of ground truth and restoration effect^[45]

3 广义光学成像系统的计算成像 PSF 工程应用

相较于还局限于几何成像理论的狭义光学成像系统,广义光学成像系统考虑了更加宽泛意义上的光学成像过程。在广义光学成像系统中,不仅可以使使用透镜等基本元件,还可以借助于散射

片、光栅和波片等具有特殊光学功能的元件。这些元件可以产生特定的光学效应,如分光、调制及干涉等,从而赋予系统更多的功能和灵活性。例如通过在光路中插入柱面镜、起偏器、相位板以及自适应光学器件,又或是调整点光源本身的特性如荧光探针的发射波长、空间位置和朝向等物理参数,可以调整系统的光学传递函数(Optical transfer function, OTF),从而影响 PSF 的形状和特性。这使得广义光学成像系统在成像质量和性能方面有更大的调控空间,能够灵活满足不同应用场景下的需求。

3.1 算法与相位调制:计算光学成像的协同设计

相位调制成像利用光波的相位信息进行图像采集和重建。在相位调制成像中,光波的相位被调控以编码目标物体的信息。通过光学硬件实现相位调制,将物体的相位信息编码于光学信号中,然后利用计算算法对编码的信息进行解码和重建,从而获取目标物体的图像。这种联合设计的方法突破了狭义光学成像系统的局限性,充分利用了非球面光学元件和计算算法的优势,为系统 PSF 的优化与调控提供了新方案。随着计算成像技术的不断发展,人们逐渐意识到了算法在光学系统设计中的重要性。相对于传统的光学设计方法,计算成像技术更加灵活,能够实现更复杂、更高效的图像采集和处理,是克服物理光学局限性并实现具有卓越性能的紧凑成像系统的强大框架。因此,人们开始以计算的思维来解决光学问题,注重光学系统与算法之间的协同设计。

Roider 等^[46]针对荧光颗粒或单个分子在单次曝光中的 3D 定位问题,提出了一种用于 PSF 工程的方法,该方法允许在两个相邻的相位掩膜上独立地塑造光学波前的两个偏振方向,这 2 个相位掩膜显示在单个液晶空间光调制器(Liquid-crystal spatial light modulator, LC-SLM)上,如图 7 所示。该设置采用偏振分束器和几何图像旋转器来矫正和处理相机检测到的 2 个偏振方向。每个偏振通道都塑造了 1 个单瓣“螺旋”PSF,在散焦时旋转,并在计算机上将 2 个偏振通道相对相位差 180° 相结合,将它们合并为 1 个显示 2 个瓣的单个 PSF,其方向包含了有关轴向位置的信息。

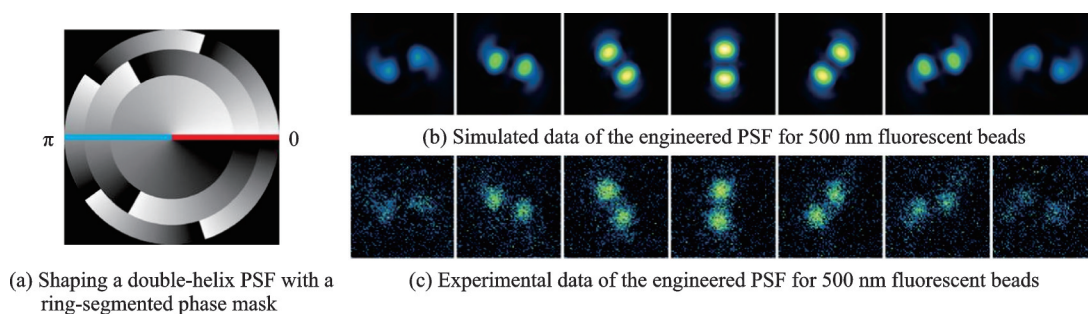
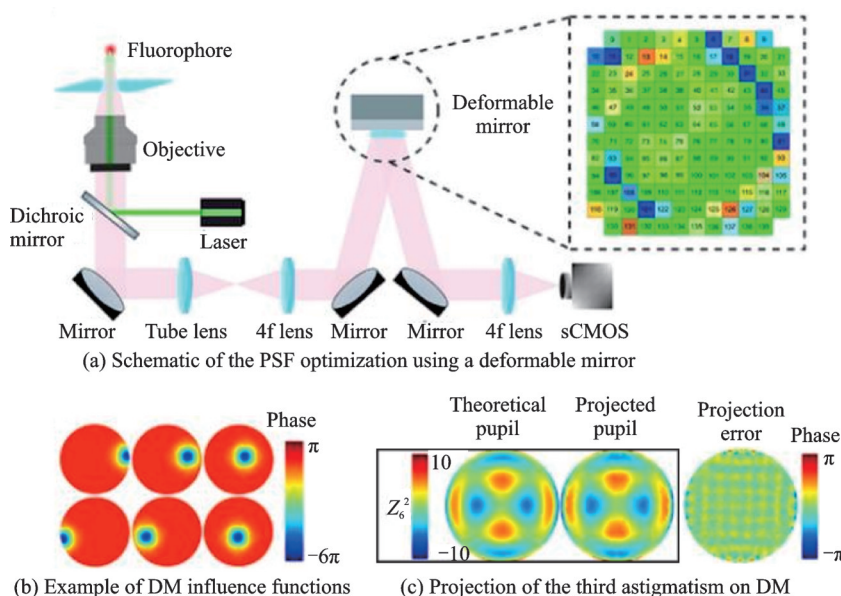


图 7 相位掩膜及 500 nm 荧光珠工程 PSF 的模拟和实验数据^[46]

Fig.7 A double-helix PSF with a ring-segmented phase mask and simulated and experimental data of the engineered PSF for 500 nm fluorescent beads^[46]

Fu 等^[47]依赖理论计算的最大信息量和相位调制器的物理行为开发了一个 PSF 工程优化框架,可以为使用可变形镜(Deformable mirror, DM)进行 3D 超分辨成像生成设备特定的最佳 PSF。他们使用干涉仪校准每个执行器的实验 DM 影响函数,没有选择优化 Zernike 多项式的系数,而是直接使用每个致动器的影响函数作为优化的瞳孔函数的基函数,如图 8 所示。其中图 8(a)使用可变形镜子进行 PSF 优化的示意图,插图是带有 140 个执行器的 DM 的控制面板,颜色表示施加到每个执行器的相对电压;图 8(b)为 DM 影响函数示例;图 8(c)为第三散光对 DM 的投射。该方法生成的 DMO-PSF (DM-optimized PSF)在性能上优于在 3D 超分辨率成像方法中广泛使用的散光 and 四足 PSF 的性能。

图8 PSF工程优化框架^[47]Fig.8 PSF engineering optimization framework^[47]

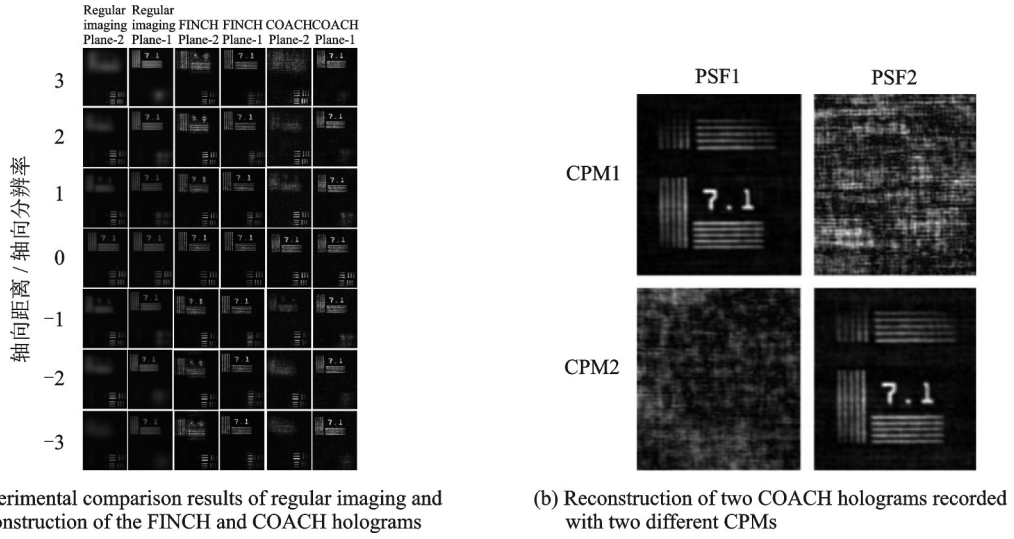
3.2 相位掩膜在全息成像中的应用:调制与解码空间信息

全息成像系统利用狭义光学系统中未曾使用的编码相位掩膜(Coded phase mask, CPM)来提高成像质量和信息容量。在这个系统中,CPM通过在光学系统中引入额外的相位调制来发挥作用。当光通过被拍摄的场景并记录在全息板上时,CPM会改变光波的相位而不改变其振幅。这种相位调制增强了对光的干涉效应,可以生成具有非传统形状的PSF。通过适当的设计模式,可以实现更加紧凑或具有特定方向性的PSF,从而使得系统可以提高空间分辨率,捕捉更精细的细节,并增强系统对空间深度信息的敏感度,使得图像中的深度信息更为清晰和准确。还可以增加全息图像的信息容量,记录更多的相位信息,从而使得图像更为丰富和复杂。

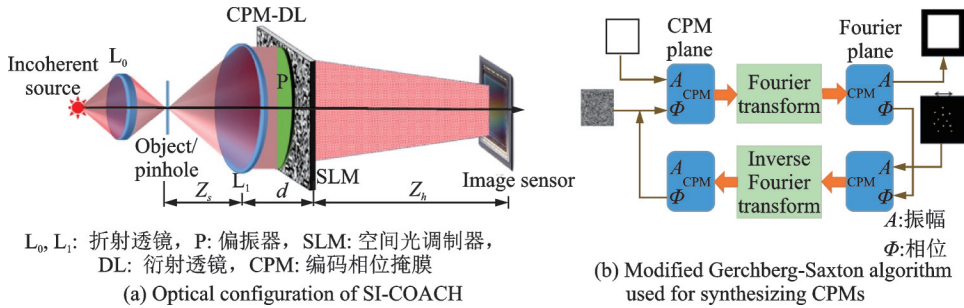
不同的CPM参数可能会导致不同的成像效果。例如,调制的频率和幅度可以影响全息图像的空间分辨率和深度信息的敏感度。合适的CPM参数选择可以优化全息成像系统的性能,产生更高质量的图像。因此,在设计全息成像系统时,需要根据具体应用需求和成像要求来选择最适合的CPM参数,以达到最佳的成像效果。

Vijayakumar等^[48]提出了一种新的非相干自信息参考数字全息系统,具有改进的轴向分辨率,称为编码孔径相关全息术(Coded aperture correlation holography, COACH)。在COACH中,编码相位掩膜CPM作为轴向分辨率增强器,通过将PSF焦深度限制在比菲涅耳非相干相关全息术(Fresnel incoherent correlation holography, FINCH)更窄的轴向区域内来发挥作用。图9(a)为常规成像和FINCH以及COACH全息图在通道1和通道2的平面1和平面2上的实验比较结果,与FINCH相比,COACH显示出更高的轴向分辨率,并且与常规成像相比表现相似。对于仅轴向偏移 ± 1 cm的情况,COACH的失焦图像在第5和第6列中比FINCH要弱;图9(b)为用不同的CPM记录在这些平面上的PSF全息图实现信息加密的效果,只有使用来自相同CPM的全息图及其相应的PSF进行重建才能产生正确的记录对象图像。

Rai等^[49]针对I-COACH(Interferenceless coded aperture correlation holography)与传统的直接成像

图9 非相干自信息参考数字全息系统^[48]Fig.9 Incoherent self-informative-reference digital holography system^[48]

相比重建图像的信噪比(Signal-to-noise, SNR)较低这一缺点,提出了一种称为稀疏 I-COACH(Sparse I-COACH, SI-COACH)的方法,使用设计的工程化CPMs来获得最佳的稀疏PSF,如图10所示。其中图10(a)为SI-COACH的光学配置;图10(b)为修改后的Gerchberg-Saxton算法用于合成CPMs。该技术总体上具有噪声抑制效果,并且在低功率照明情况下表现最佳。

图10 稀疏 I-COACH 方法示意图^[49]Fig.10 Schematic diagram of sparse I-COACH method^[49]

Yu等^[50]针对COACH中截止频率受PSF、CPM的散射程度和数值孔径(Numerical aperture, NA)的限制,以及随着距离的增加,点光源对光的照射减少,导致远场中PSF的强度模式不可检测这两个PSF记录方面的问题,提出了一种基于波前调制的方法来记录PSFs,由这种调制波前记录的PSF被称为虚拟点扩散函数(Virtual point spread function, VPSF),如图11所示。其中图11(a)通过点光源和波前调制记录PSF;图11(b)透镜自由干涉COACH的实验设置。这一方法摆脱了传统记录方法的局限性,使得记录远场PSF成为可能。

Yasuki等^[51]以固定眼睛位置的全息显示为基础,在固定眼睛位置的全息图中,通过计算整个PSF的一部分分布,观察到重建图像的图像质量和焦深几乎与整个PSF生成的重建图像一样高。从中受到启发,设计交叉和径向PSFs并结合查找表方法和波前记录平面方法来加速计算固定眼睛位置的全息图。重建的图像与使用整个PSF重建的图像具有几乎相同的图像质量和焦深,如图12所示。其中图

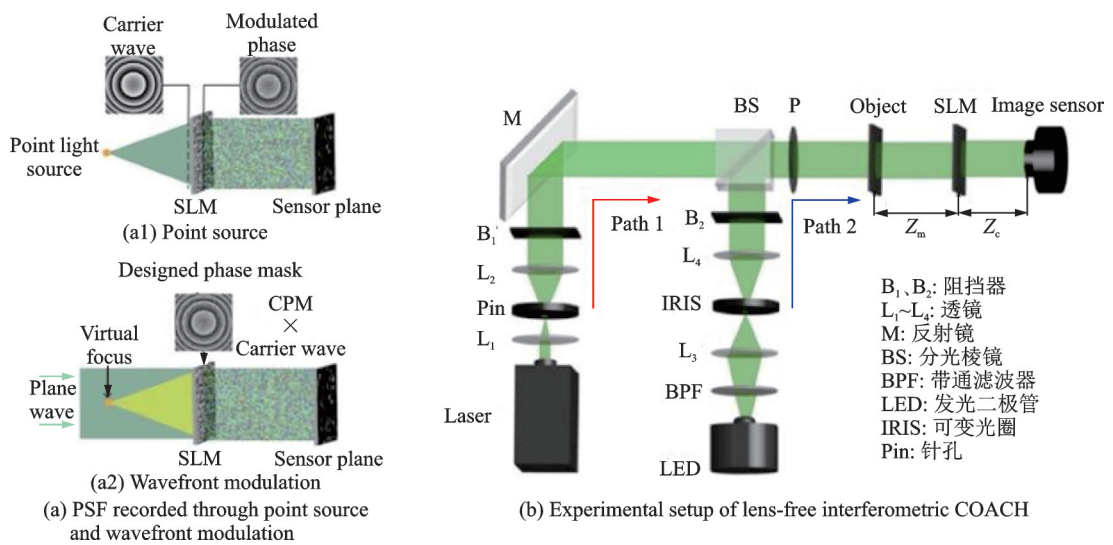


图 11 基于波前调制方法的 PSFs 记录^[50]

Fig.11 PSFs recorded through wavefront modulation^[50]

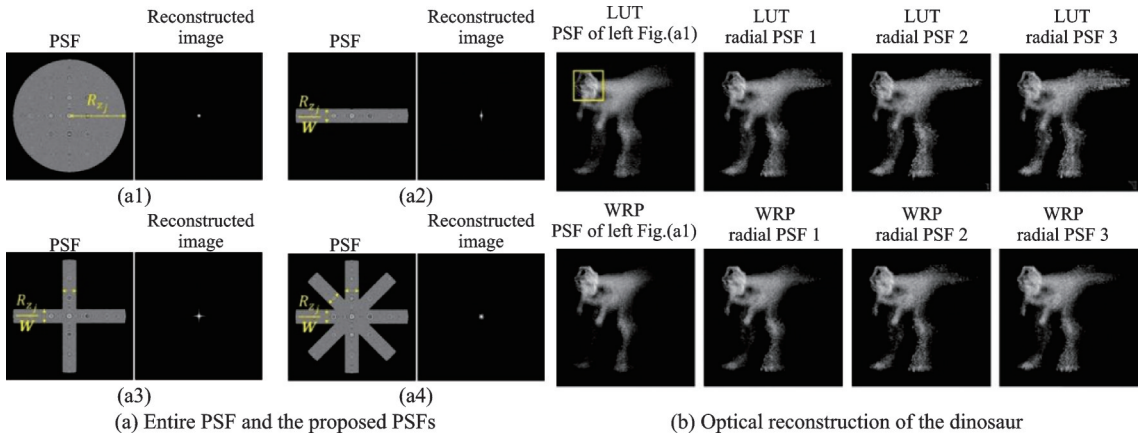


图 12 完整 PSF 与提取的部分 PSF 以及重建结果^[51]

Fig.12 Entire PSF , extracted part of PSF and reconstruction result^[51]

12(a)为整个 PSF 和所提出的 PSFs;图 12(b)为恐龙的光学重建。

当径向 PSF 应用在具有宽视角的裸眼显示器时,眼睛位置移动导致部分重建图像丢失的问题,Ya-suki 等^[52]提出了两种 PSFs 来解决:一种是阻挡径向 PSF;另一种是旋转阻挡径向 PSF,如图 13、14 所示。该方法可以通过计算旋转阻挡径向 PSFs 的全息图来应用于具有广视角的全息显示器。

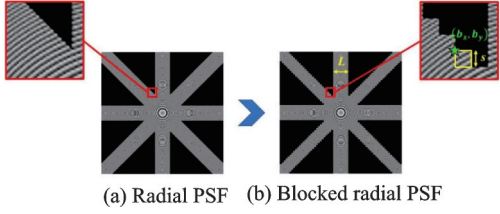


图 13 径向 PSF 和阻挡径向 PSF^[52]

Fig.13 Radial PSF and obstructed radial PSF^[52]

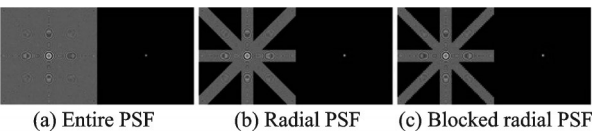


图 14 整个 PSF、径向 PSF 和阻挡的径向 PSF 及其聚焦特性^[52]

Fig.14 Entire PSF , radial PSF and obstructed radial PSF with their focusing characteristics^[52]

3.3 无透镜成像:计算光学的紧凑革新

无透镜成像技术不再依赖传统透镜的点对点映射,而是设计入射光场和传感器测量之间复杂但可逆的传递函数。获取的传感器测量结果不再构成传统意义上的图像,而是可以与适当的逆算法结合以重建场景的聚焦图像的数据。这种技术将图像信息编码于光学硬件中,并通过计算算法进行解码,实现了光学和算法的联合设计。该方法要求无透镜光学系统的PSF与图像重建算法协同设计,以确保光学系统中编码的图像信息能够被算法有效解码。近年来,基于这一理念涌现出了多种振幅型和相位型的平面无透镜成像系统,这些系统不仅保持了极高的结构紧凑性,同时还大大提高了成像系统的分辨率。

振幅掩膜被设计用于调制光波产生二进制的PSF。早期的设计模式选择了随机的振幅分布阵列或是信号处理技术中用于增加传感器阵列冗余度的均匀冗余阵列(Uniform redundant array, URA)。DeWeert等^[53]针对改进的均匀冗余阵列(Modified uniformly redundant arrays, MURAs)存在的固有问题:大图像的逆问题存在病态性且容易受到衍射的影响,提出了一种可分离的双托普利茨矩阵(Doubly-Toeplitz)掩膜,实现了对衍射干扰的剔除以及在自然光下对扩展场景进行成像,如图15所示。

Asif等^[54]通过分析研究循环系统采用的多种掩膜模式设计,提出了一种被称为FlatCams的振幅调制掩膜,如图16所示。通过使用2个一维M序列图案的外积实现可分离的掩膜图案,以此降低计算复杂性,减轻了图像重建的计算负担。该设计将掩膜置于图像传感器前,大大减小了相机厚度;使用具有50%透明特征的二元掩膜图案,保留了较高的光收集效率;使用可分离的掩膜图案,使得校准和重建更简单。

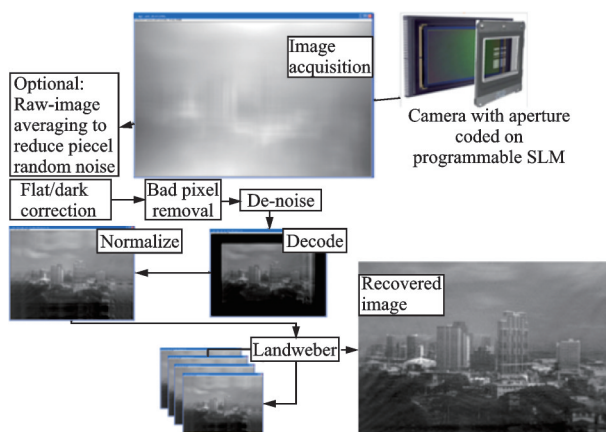


图15 编码孔径图像采集和解码的处理流程^[53]

Fig.15 Process of capturing and decoding the encoded aperture image^[53]

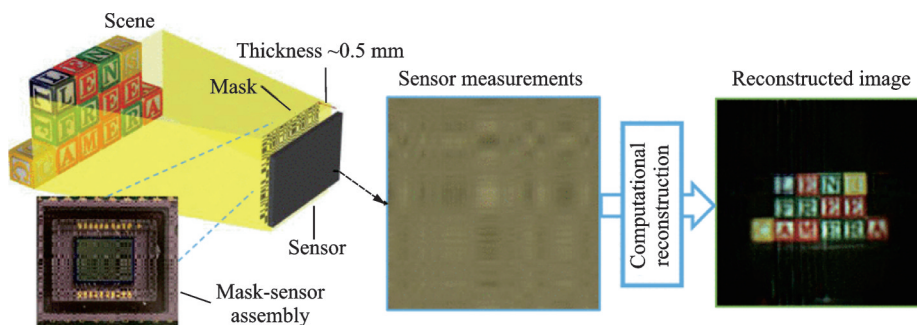


图16 FlatCam 架构^[54]

Fig.16 Architecture of FlatCam^[54]

Adams等^[55]打破了传统的显微镜架构设备尺寸和性能之间的基本权衡,提出的FlatScope系统是世界上最小、最轻的显微镜,实现了在非相干源条件且没有额外光学元件的情况下对全息方法的直接扩展,如图17所示。图中点扩散函数(C)可以分解为两个独立的、可分离的项:第1项模拟假设的没有孔径的效果(D和F),第2项模拟了掩膜图案编码带来的影响(E和G)。用放置在传感器上方几百微米处的优化振幅掩膜结合重建算法,将捕获的单帧传感器数据转换为高分辨率3D图像。使用由2个一维

函数的外积组成的可分离掩膜图案,实现了对不相干的PSF的调制,从而使高频空间信息可恢复。该掩膜设计解决了Asif等提出的模型^[54]在点源距离接近设备尺寸时失效的情况。

Tajima等^[56]提出在图像传感器前放置菲涅尔波带片(Fresnel zone aperture, FZA)作为掩膜进行无透镜光场成像,利用图像传感器捕获的真实FZA产生的阴影与虚拟的FZA干涉形成摩尔条纹,光的入射角对应于摩尔纹条纹的空间频率,最终通过使用2D-FFT来重建原始物体图像,如图18所示。其中图18(a)为FZA图案示例;图18(b)为由于倾斜入射光而产生的移位阴影FZA;图18(c)为由于FZA和阴影之间的干涉而产生的莫尔条纹;图18(d)为条纹的傅里叶变换但是振幅型无透镜成像掩膜因其选择性透光的性质,其允许的光通量存在较大的局限性,损失了很大一部分的光强,对光的收集能力相对较弱,并且其衍射效应或多或少会影响到接收的PSF。而相位型的掩膜则不然,能够充分有效地利用所有被探测器收集的光。

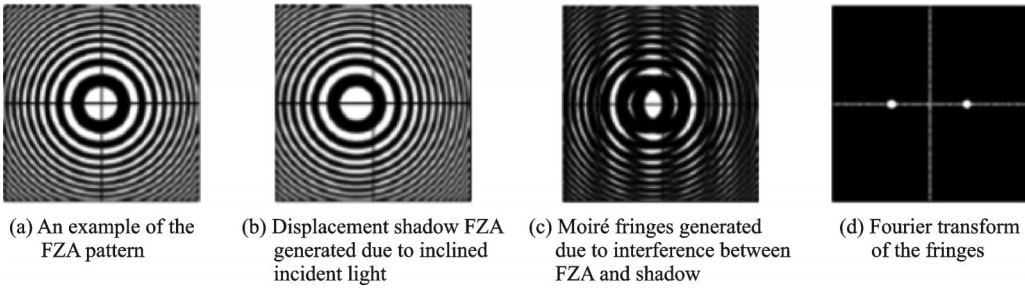


图18 FZA的使用原理实例^[56]

Fig.18 Example of the usage principle of FZA^[56]

Antipa等^[57]选择使用随机散射片代替编码光学元件,其光学模型与散射成像有一定的相似性。借助于光学记忆效应,空间中点源的平面移动将引起PSF的协同移动,点源的轴向移动导致PSF以相面对应区域中心点进行缩放,如图19所示。借助这种移位不变性能够将成像模型简化为卷积模型,扩散器被视为以焦散模式对点源的3D位置进行编码。利用散斑图案特有的稀疏性,DiffuserCam能够结合压缩感知实现单帧图像的三维无透镜成像功能,但是这种利用散斑的统计特性完成成像的方法导致散射介质的设计灵活性大大降低。

Boominathan等^[58]提出了一个近场相位检索框架来设计相位型掩膜,其系统被称为PhlatCam,如图20

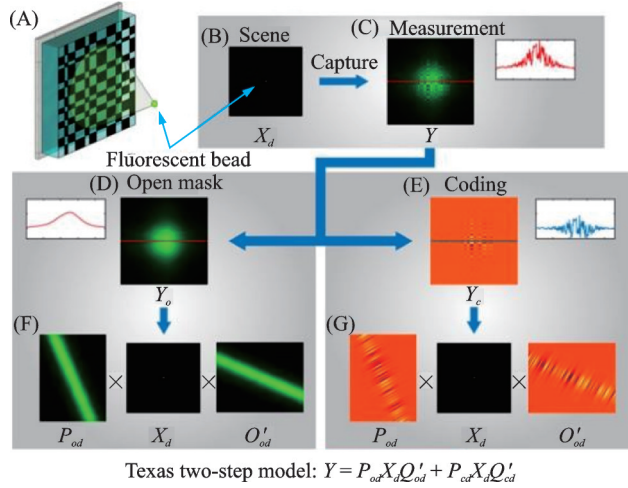


图17 FlatScope系统^[55]

Fig.17 FlatScope system^[55]

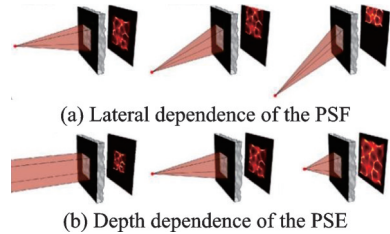


图19 焦散模式随场景中点源随横向位移而移动并随轴向位移而缩放^[57]

Fig.19 Defocus pattern moving laterally with the lateral displacement of the point source in the scene and scaling with axial displacement^[57]

所示。该方案利用信号处理中的概念进行设计,以实现到位深度受限传感器的最大信息传输,有着较强的编码能力。在前述设计理念的影响下,作者列出了PSF的几个预期特征:包含所有方向滤波特性、空间稀疏、高对比度(即二进制)和拥有连续零强度的大区域。在使用以上几个筛选条件后,选择了采用从Perlin噪声中生成的轮廓线作为等值线PSF,然后通过掩膜平面和传感器平面进行菲涅耳正向、反向的传播迭代过程进行相位掩膜优化获得最终的相位掩膜。

Fu等^[59]从生物复眼中得到灵感,通过引入傅里叶域度量指标:调制传递函数体积(Modulation transfer function volume, MTFv)作为光学系统采集信息量量化的标准,从复眼模拟中设计出最佳的PSF,由此得到的相位函数称为Voronoi-Fresnel相位,如图21所示。该掩膜以一阶菲涅耳相位函数为基,紧密排列成具有不规则的准质心Voronoi单元阵列,此结构能够有效地将光聚到近轴区域的衍射极限光斑中,并且每个Voronoi单元不规则的多边形孔径结构将使单个PSF的空间滤波多样化。在通过以MTFv为指标的优化后,所得到的Voronoi-Fresnel相位掩膜获得了更优秀的频域信息保留能力,能够实现更好的图像计算重建。

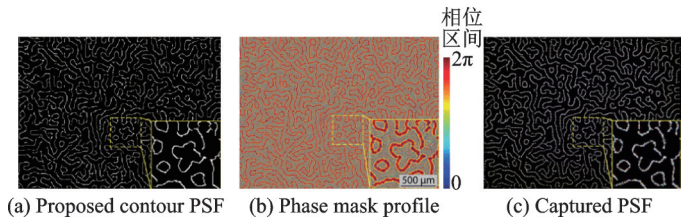


图20 本文提出的PSF、设计的相位掩膜和PhlatCam实验实现的PSF^[58]

Fig.20 The proposed PSF, designed phase mask and experimental implementation of PSF for PhlatCam^[58]

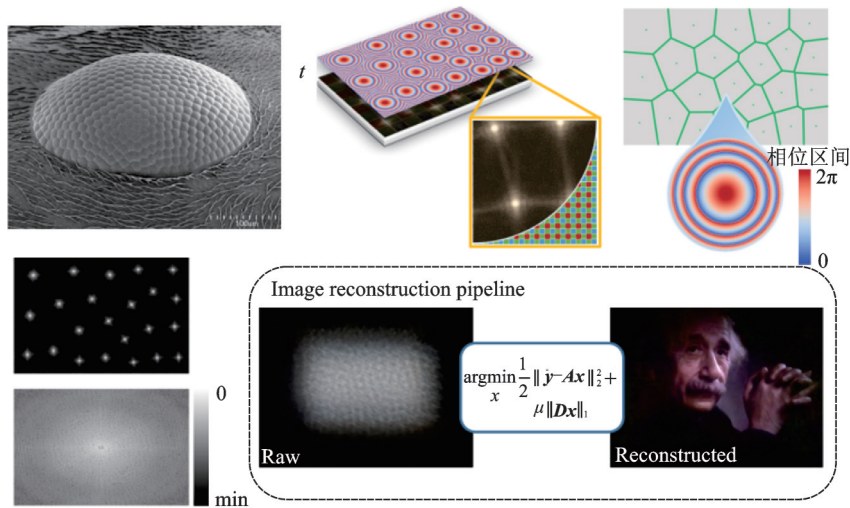


图21 Voronoi-Fresnel无透镜成像概述^[59]

Fig.21 Overview of Voronoi-Fresnel lensless imaging^[59]

3.4 散射成像:突破不可见

散射成像是狭义光学成像的进一步扩展,其在成像链路中引入了广义光学器件——散射介质,打破了传统成像中物像一一对应的共轭关系。由于散射介质的存在,目标往往在成像面形成无序的散斑图样。过去数十年以来,如何从杂乱的散斑中恢复并提高目标信息成为了科研人员想要迫切解决的难题。

Feng等^[60]在1988年提出了光学记忆效应。随后,Freund等^[61]利用实验验证了提出的角度光学记忆效应,即入射光线在散射介质的一定角度范围内转动,其在像面上产生的图像是高度相关的。Judke-

witz等^[62]在2015年提出了平移光学记忆效应,即在一定的平移范围内,入射光进行平移,则产生的散斑图也发生相应的平移。这个角度范围和平移范围被称为光学记忆效应范围,可以将光学记忆效应范围内的各点源认为是高度相关的,因此其满足PSF的定义,从而对获取的散斑图进行求逆恢复。

图22为一简单散射系统^[63],其中目标物体距离散射介质(DG10-220-MD型号毛玻璃,索雷博)为21 cm,散射介质到探测器距离为7.6 cm。光学记忆效应范围 Δx 可以根据 $\Delta x = 2 \times \Delta p \times p / \beta$ 来计算,其中 Δp 代表了图像中的偏移像素,一般认为有效的光学记忆范围是互相关系数大于0.5的区域,根据互相关曲线的半高、半宽可以确定偏移像素为120像素; p 代表了像素尺寸,其大小是 $6.5 \mu\text{m}$; β 代表了系统的放大率,将散射介质可以认为散射透镜,其放大率为 $\beta = v/u = 7.6/21 \approx 0.362$,经过计算得到系统的光学记忆效应范围为4.31 mm。

3.4.1 大视场成像

在广义光学成像系统的散射系统中,由于光学记忆效应范围的影响,根据探测器得到散斑图恢复物面视场范围很有限,散射介质可以成像的视场范围往往小于其他元器件的硬光阑。即使成像面包含了所有的物面信息,PSF也仅能恢复光学记忆效应范围内的物面信息,超出范围的物面信息无法恢复出来,因此实现大视场成像对于散射成像来说很有必要。

对于尺寸超过散射成像系统的物体 O ,可以将物体 O 拆分为 m 个子区域 O_m ,产生的散斑 I_m 在成像面叠加形成探测器捕获的散斑 I 。产生的散斑 I 可以表示物体 O 的各个子区域 O_m 与对应点扩散函数 PSF_m 的卷积形式,有

$$I = \sum_m I_m = \sum_m O_m * \text{PSF}_m \quad (19)$$

由于光学记忆效应范围的高相关性^[64],在同一光学记忆效应范围(Optical memory effect range, OMER)内产生的点扩散函数具有高相关性,其互相关可以获得1个脉冲响应。不为同一个视场内产生的PSF则没有相关性,其互相关结果为0,可以表示为

$$\begin{cases} \delta = \text{PSF}_m \star \text{PSF}_n & m, n \in \text{OMER} \\ 0 = \text{PSF}_m \star \text{PSF}_n & m, n \notin \text{OMER} \end{cases} \quad (20)$$

式中 \star 表示互相关运算。因此获得的散斑图 I 与采集到的点扩散函数 PSF_m 仅能恢复对应光学记忆效应范围内的目标光学视场。Li和Tang等^[65-66]利用根据采集的散斑图 I 与一系列预先标定的点扩散函数 PSF_m 实现对目标 O 的恢复,从而扩大光学记忆效应范围成像。上述是在采集一张散斑图与若干PSF进行恢复大视场的情况,也可以在采集单张PSF之后,不断地移动目标 O ,使得目标的各个子区域 O_m 的散斑 I_m 都被采集到,然后分别进行求逆重建,从而拼接形成大视场目标 $O = \sum_m O_m = \sum_m \text{Deconv}(I_m, \text{PSF})$ 。

Zhang等^[67]提出了不需要预先标定PSF的方法,其团队通过估计与矫正PSF来增大视场范围,如图23所示^[67-68]。首先分别照亮子目标 O_m 得到相应散斑图 I_m ,需要确定相邻子目标之间需要存在一定的交集且每个子目标都在光学记忆效应范围内,然后根据散斑自相关方法分别恢复目标,再估计

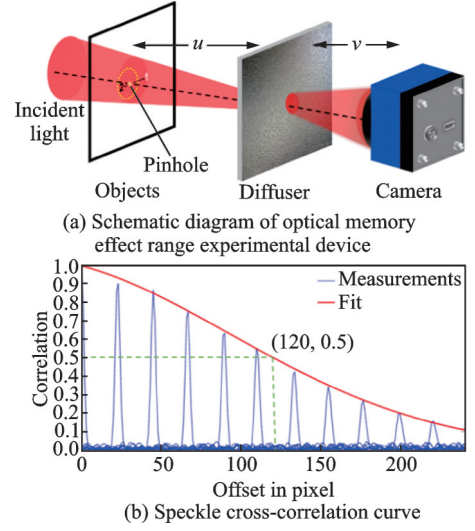


图22 光学记忆效应^[63]

Fig.22 Optical memory effect^[63]

得到相应的 PSF_m , 如果得到的 PSF_m 正确, 其可以恢复相邻的散斑图 I_{m+1} 。再根据矫正得到的 PSF_m 进行互相关运算 $\vec{P}_{m,m+1} = \text{position} \{ \text{PSF}'_m \star \text{PSF}'_{m+1} \} - \text{position} \{ \text{PSF}'_m \star \text{PSF}'_m \}$, 从而确定子目标之间的移位, 进而拼接形成大视场目标。

3.4.2 多维度成像

上文提到的大视场成像是基于 PSF 强度维度信息实现的。然而, 单一维度信息往往无法获取足够多的目标本征特性。因此, 本节在利用 PSF 强度信息的基础上, 从空间、光谱、偏振和时间 4 个维度进行补充扩展, 使得散射成像更加全面、准确。利用 PSF 的多维信息不仅可以提高复杂环境下成像的分辨率与准确性, 还可以更好地实现对目标的识别、定位和分析, 为相关领域研究和应用提供更加丰富和有效的手段。

(1) 空间维度: 扩展景深与目标位置定位

扩展景深 (Depth of field, DOF) 与目标位置定位也是近年来散射成像领域研究的重点问题, 本质上是对轴向目标聚焦问题的研究。由于光学记忆效应的存在, 含有散射介质系统的景深也是有限的, 位于 DOF 之外的目标往往会变得模糊且不太清晰, 由于 PSF 对散焦并不敏感, 引入轴向 PSF 信息对确定目标性质有着极大的帮助。

Xie 等^[69]通过操纵给定的 PSF, 实现透过散射介质的深度分辨成像来扩展原始 DOF。其团队利用严格的公式推导验证了轴向 PSF 之间的关系, 即通过缩放因子 $m = f/f'$ 可推导出附近物面所产生的 PSF, 其中 f 与 f' 为散射介质的焦距。该方法的深度分辨率比传统的方法提高了 5 倍, 同时实验验证了可以从单帧散斑图中恢复超出原始景深的 3 个目标。Liao 等^[70]提出基于光学传递函数极坐标表示的模糊函数解析模型, 分析散射系统的 DOF 特性, 表明由于成像系统中散射介质的存在, 成像面可以收集到因散焦丢失的高频成分, 同时实验表明叠加校准的一系列 PSF 可以得到 PSF 堆栈, 从而重建大 DOF 图像。扩展景深成像如图 24 所示, 其中图 24(a) 为利用单点 PSF 的扩展实现 3 个不同景深物体的同时恢复, 图 24(b) 为利用 PSF 堆栈实现 2 个不同景深物体的同时恢复。

由于单个透镜无法将颜色汇聚到同一个汇聚点, 该特性也可以用于测量深度与位置定位。Xie 和 Liang 等^[71-72]确定两个不同深度、不同波长的 PSF 之间的特定比例关系, 提出了一种波长-深度匹配的方法实现超大 DOF 成像与探测深度的能力, 如同 25 所示。其中图 25(a) 为实验装置, 图 25(b) 为参考物体的中心波长和相应的恢复结果之间的关系; 图 25(c) 为不同波长下恢复图与原始图的相关性。其团队首先在已知一个参考光源的散射介质焦距 f_1 与相应波长 λ_1 的 PSF_1 情况下, 通过严格公式推导得到当 $\lambda_2 f_2 / (\lambda_1 f_1) = 1$ 时, PSF 之间的关系为 $\text{PSF}_1\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} x_i, \frac{\lambda_1}{\lambda_2} y_i\right) = \text{PSF}_2(x_i, y_i)$, 表示利用色差补偿深度差, 进一步扩展 DOF, 该方法在实验中实现了单侧 90.5 mm 的超大景深。

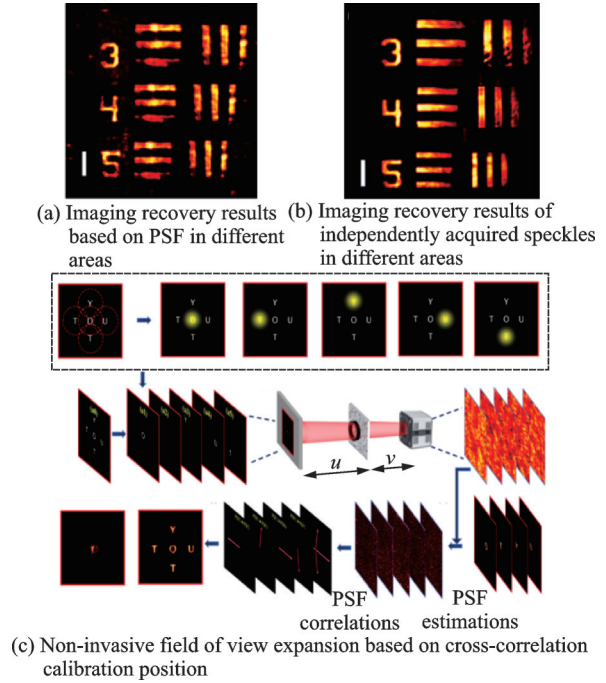


图 23 透过散射介质实现大视场成像^[67-68]

Fig.23 Extending field of view imaging through scattering media^[67-68]

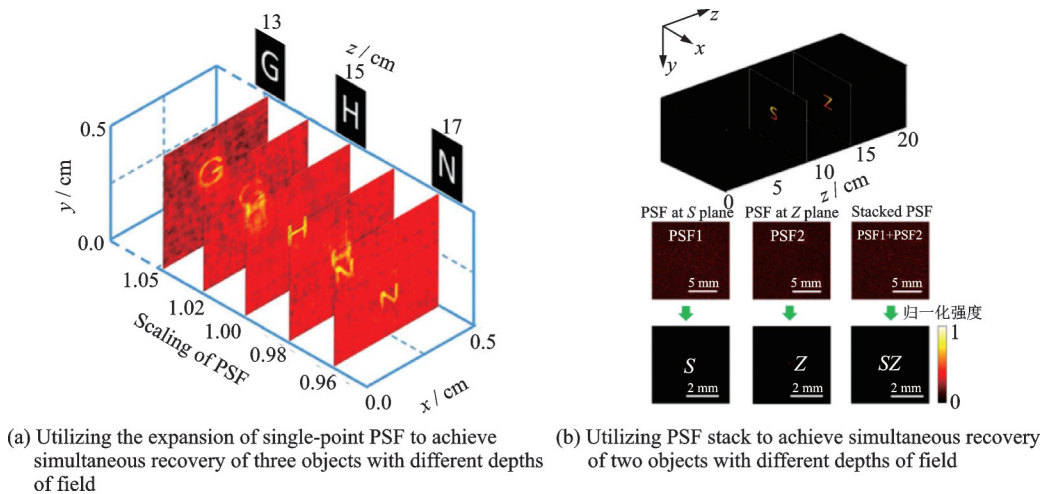


图 24 扩展景深成像^[69-70]

Fig.24 Extending depth of field imaging^[69-70]

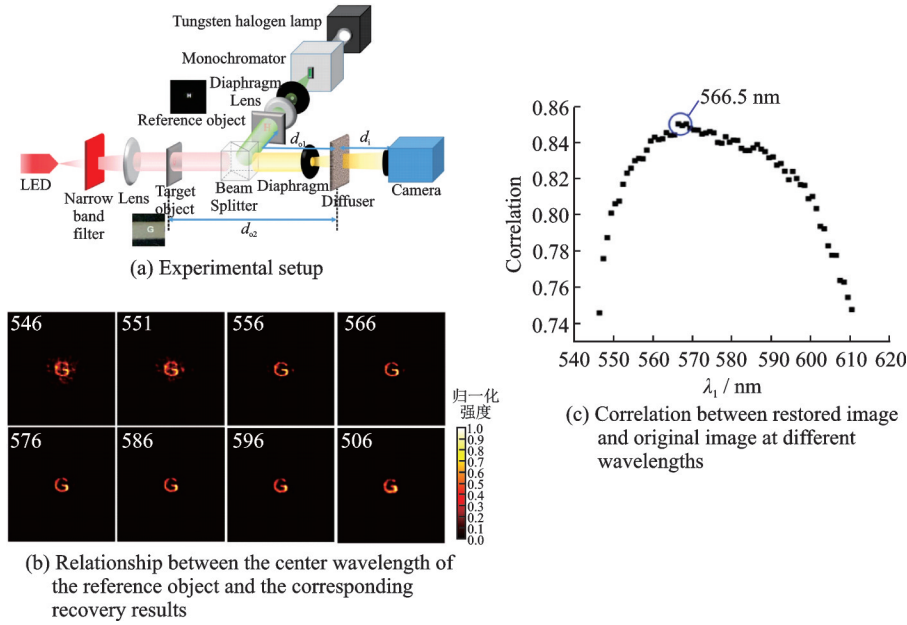


图 25 波长-深度匹配^[71-72]

Fig.25 Wavelength-depth calibration^[71-72]

双螺旋 PSF(Double-helix point spread function,DH-PSF)由 Greengard 等在 2006 年提出^[73],在系统中引入掩膜,将成像面的单高斯分布光斑调制为双高斯分布双光斑,如果掩膜在系统中的轴向位置发生变化,则双光斑相对位置也会随着发生变化,因此可以用于目标定位与目标跟踪,提高了上述取决于几何关系或恢复算法的定位精度。Gao 等^[74]仿真表明可以采用空间光调制器生成 DH-PSF 相位掩膜实现非稀疏目标成像与定位,并利用散射自相关和相位恢复算法恢复了清晰的目标。

Anand 等^[75]利用仿真实现多光谱大景深的 PSF 集对散斑恢复。在实际成像中,需要预先测定目标附近的 PSF 集,实现透散射介质的三维成像,但是该方法工程量很大,同时对采集 PSF 准确性要求比较高。李元铨等^[76]提出利用结构光透过散射介质实现三维成像的方法,其团队采用普通工业相机采集多

帧PSF,并叠加平均得到高信噪比PSF,将该PSF与结构光的散斑进行求逆解译得到含有目标信息的结构光,再通过傅里叶变换轮廓术得到物体的三维信息。透过散射介质实现三维成像过程如图26所示。其中图26(a)为利用PSF集实现三维成像;图26(b)为利用结构光实现三维成像。

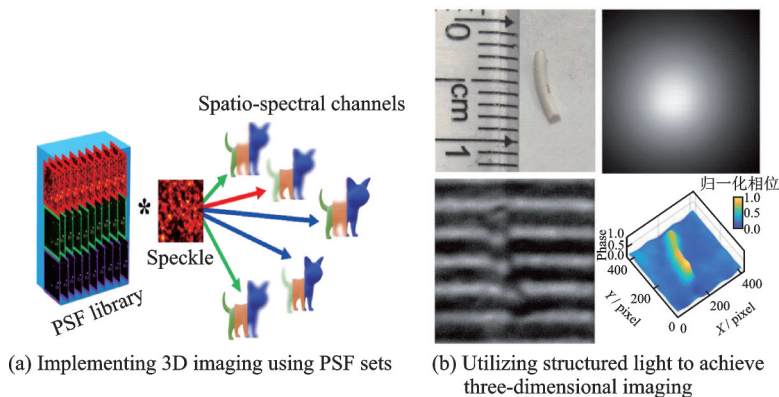


图26 透过散射介质实现三维成像^[75-76]

Fig.26 Three-dimensional imaging through scattering media^[75-76]

(2)光谱维度:多光谱成像

当散射介质同时被多光谱照射时,成像面上不仅会产生空间散斑,也会产生光谱散斑,会导致脉冲的时间展宽^[77],因此在光谱中也存在光学记忆效应,即如果2个光谱产生的散斑小于光谱去相关带宽,则2个散斑图样是高度相关的,否则可以认为是不相关的。利用PSF从本质说明光谱对成像的影响,在目前的研究中,研究人员倾向于将宽谱下的PSF视作窄谱PSF的线性叠加^[78]。如图27所示,Sahoo等^[79]提出利用多光谱PSF实现对彩色目标的恢复,其团队利用单色相机采集彩色目标散斑图与各个波

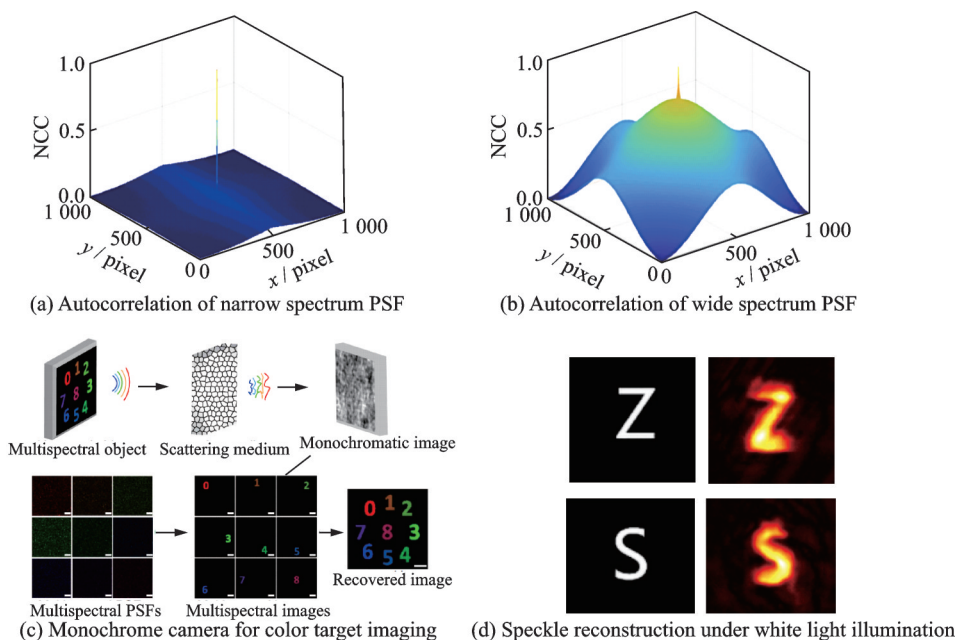


图27 多光谱成像^[79-80]

Fig.27 Multispectral imaging^[79-80]

长对应的 PSF,再利用逆卷积进行恢复得到彩色目标;Lu等^[80]提出一种改进的迭代算法,并对光学传递函数进行可解释的约束,实现了白光照明下的非侵入式单帧散斑重建。其中图 27(a)为窄谱 PSF 自相关,NCC 表示归一化相关系数;图 27(b)为宽谱 PSF 自相关;图 27(c)为单色相机实现彩色目标成像;图 27(d)为白光照明下散斑重建。相较于窄带光谱 PSF 自相关产生的脉冲响应,宽带光谱产生 PSF 自相关则产生了展宽。

(3) 偏振维度:偏振 PSF

由于水体中颗粒的散射与吸收,目标信息光沿着浑浊的水体传播会存在明显的光衰减,因此提高水下成像质量是一项具有挑战性的工作。Zhang 等^[81]提出利用偏振 PSF(polarization PSF, pPSF)增强水下成像的方法,如图 28 所示。其分别设置了线偏振光和圆偏振光两种入射光,采用蒙特卡罗方法计算水下散射粒子的 Stokes 矢量分布,有效模拟偏振光传输以研究光传输与 pPSF,证明在水下的扩散区域中,利用 pPSF 对采集的散斑进行复原具有更显著的作用。

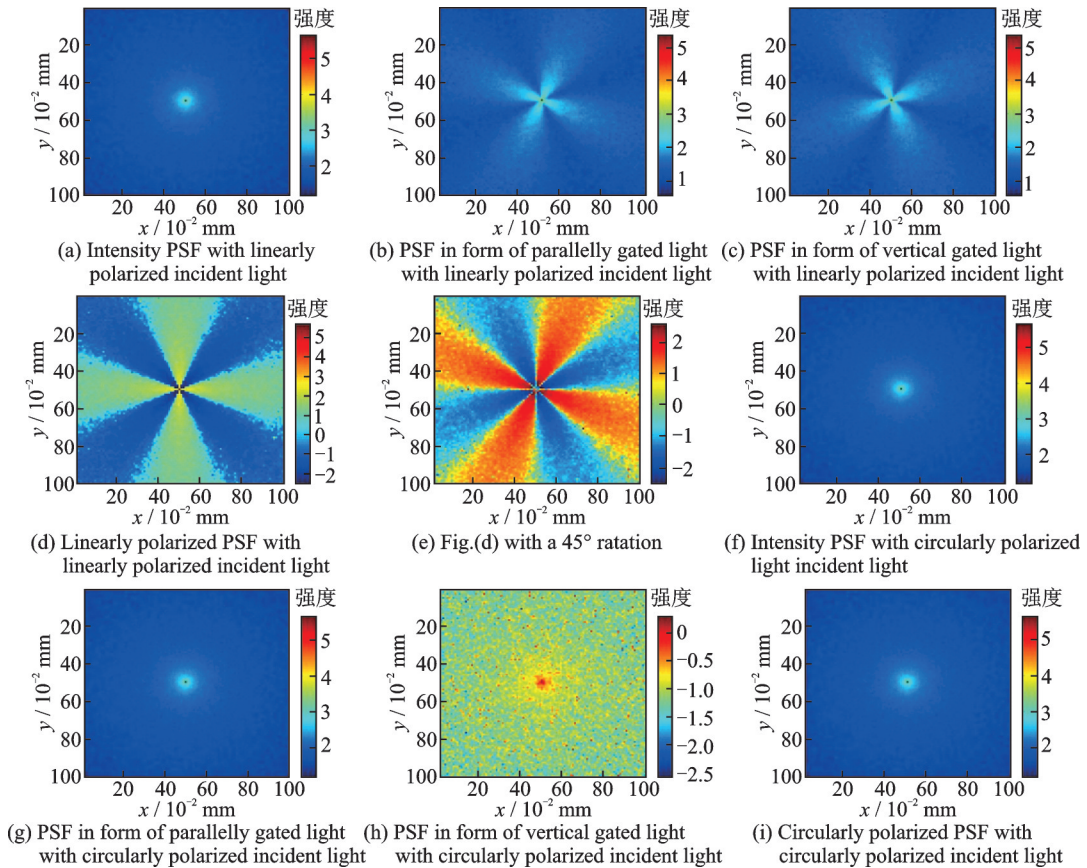


图 28 PSF 仿真结果^[81]

Fig.28 PSF simulation results^[81]

(4) 时间维度:动态散射介质成像

当散射介质发生移动时,很容易破坏散斑的结构,使捕获的散斑图之间迅速退化。因此对于时变的稠浊散射介质,散斑的去相关时间会远远小于采集散斑的时间,导致采集的 PSF 与散斑无法对应,从而导致图像复原模糊。Shi 等^[82]分别从散射介质围绕光轴旋转、沿着光轴平移、围绕横轴旋转等维度进

行散斑失真分析,通过对预先采集的PSF进行整形,基于复原图像的最小熵评价确定最优PSF。Shui等^[83]记录一段时间间隔内动态散射介质的PSF,并将其组合成具有遍历性质的系综点扩散函数(ensemble PSFs, ePSFs)。ePSFs基本上包含了散射系统所有的散射特性和介质的光学信息。在采集目标散斑图的过程中,其团队记录一段时间内的散斑图形成系综散斑图,然后根据傅里叶变换的处理方式能够在时变浑浊介质中恢复目标物体。动态散射介质成像过程如图29所示。其中图29(a)为散射介质围绕光轴旋转产生的散斑重建结果图;图29(b)为系综散斑与系综PSF的散斑重建结果图。

4 结束语

本文围绕计算成像框架下的PSF工程技术,对狭义光学系统与广义光学系统中应用PSF工程方法的技术进行介绍。狭义光学系统中的PSF工程主要围绕光学系统像差的校正进行,从几何光学的角度对光在系统中的传播进行表示。在以单透镜成像技术为代表的极简光学系统设计中,通过像差和噪声

建立的图像退化模型,利用PSF对降质图像进行求逆处理,进而复原得到接近原生质量的校正图像;而应用自适应光学的方法主要依赖于波前传感器对波前误差的监测,从波前畸变产生的像差来估计成像时刻的PSF,进而通过盲解卷积的方法重建出接近衍射极限的图像。广义光学系统中应用的PSF工程技术以对光场的编码调制为主,通过在系统中添加经过设计的非球面光学元件,以成像需求为导向来调整和优化成像系统的PSF。这种技术不仅限于简单改变光学系统的光学响应,而且可以在各种成像环境下实现对成像特性的精细调控。结合环境特性设计合适的PSF,通过PSF的变化特性获得目标的先验信息,提高复杂环境的信息通量。优化传感器设计和数据处理算法,可以解译获得恢复目标精细结构所对应的高频信息甚至是其他光学维度的信息,在给定硬件的条件下超越传统光学系统成像极限,提高成像质量和准确性。传统光学成像和计算成像框架对PSF这一信息传递渠道存在不同理解与视角,PSF不仅是描述系统性能的参数,也是优化成像过程和提高成像质量的重要手段。

PSF工程已经在诸多领域内取得了成功,但仍存在一系列问题有待解决:(1)极简系统获得的模糊降质图像丢失了部分信息,图像去卷积所求解的是一个严重的病态问题;(2)根据物理过程简化得到的图像退化模型与真实模型仍有一定差距,如何结合透镜系统与探测器特性整体考虑,发展更加精确的降质成像模型是一个难点;(3)对光场进行调控的编码元件大多是为某类环境特化制作的,因此系统对于环境的变动十分敏感,在多变的外部环境中,如何稳定和保持高质量的成像效果是一个关键挑战;(4)目前成像系统的电子元件精度也是PSF优化中需要考虑的重要部分,未来硬件与算法的重心倾向值得深思;(5)基于PSF工程的散射成像技术需要成像时对应的PSF,而动态介质的变化将改变PSF的形态,因此如何在快速时变的散射介质中实现高分辨率成像仍是难以解决的问题。

参考文献:

- [1] HUANG F M, ZHELUDEV N I. Super-resolution without evanescent waves[J]. Nano Letters, 2009, 9(3): 1249-1254.

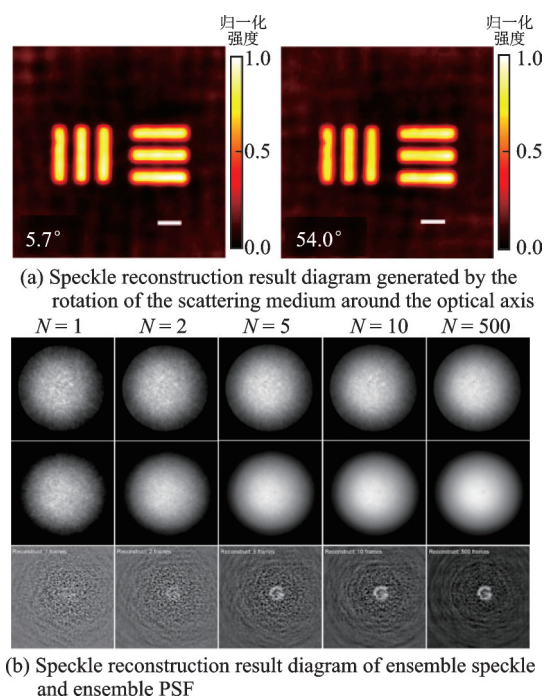


图29 动态散射介质成像^[82-83]

Fig.29 Dynamic scattering media imaging^[82-83]

- [2] BERTOLOTTI J, KATZ O. Imaging in complex media[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(9): 1008-1017.
- [3] 顿雄, 付强, 李浩天, 等. 计算成像前沿进展[J]. *中国图象图形学报*, 2022, 27(6): 1840-1876.
DUN Xiong, FU Qiang, LI Haotian, et al. Advances in computational imaging[J]. *Chinese Journal of Image and Graphics*, 2022, 27(6): 1840-1876.
- [4] 金飞, 张彬, 司璇, 等. 基于维纳滤波的图像复原[J]. *中国传媒大学学报(自然科学版)*, 2011, 18(4): 19-23.
JIN Fei, ZHANG Bin, SI Xuan, et al. Image restoration based on Wiener filter[J]. *Journal of Communication University of China(Natural Science Edition)*, 2011, 18(4): 19-23.
- [5] LI J, ZHAO L, WU X, et al. Computational optical system design: A global optimization method in a simplified imaging system[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(20): 5916-5925.
- [6] ZHENG Y D, HUANG W, PAN Y, et al. Wide-spectrum PSF estimation for simple optical system[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1418-1430.
- [7] OPATOVSKI N, XIAO D, HARARI G, et al. Monocular kilometer-scale passive ranging by point-spread function engineering[J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 37925-37937.
- [8] ASCENSO J, NEICHEL B, SILVA M, et al. PSF reconstruction for AO photometry and astrometry[C]//*Proceedings of Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes*. [S.l.]: UCLA, 2015.
- [9] HUBING B, LI M. Design of large aperture and long focal length zoom optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 644-649.
- [10] KRIST J E. Deconvolution of Hubble space telescope images using simulated point spread functions[C]//*Proceedings of Astronomical Data Analysis Software and Systems I*. [S.l.]: [s.n.], 1992, 25: 226.
- [11] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *JoSA*, 1972, 62(1): 55-59.
- [12] SHEPP L A, VARDI Y. Maximum likelihood reconstruction for emission tomography[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1982, 1(2): 113-122.
- [13] HUNT B. A matrix theory proof of the discrete convolution theorem[J]. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1971, 19(4): 285-288.
- [14] JAIN A K. Fundamentals of digital image processing[M]. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc., 1989.
- [15] 邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 3-47.
SHAO Xiaopeng, LIU Fei, LI Wei, et al. Recent advances in computational imaging technology and applications[J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2020, 57(2): 3-47.
- [16] DELBRACIO M, KELLY D, BROWN M S, et al. Mobile computational photography: A tour[J]. *Annual Review of Vision Science*, 2021, 7: 571-604.
- [17] 王新华, 郝建坤, 黄玮, 等. 基于简单透镜计算成像的图像复原重建[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2017, 47(3): 965-972.
WANG Xinhua, HAO Jiankun, HUANG Wei, et al. Image restoration and reconstruction based on simple lenses computational imaging[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(3): 965-972.
- [18] HEIDE F, ROUF M, HULLIN M B, et al. High-quality computational imaging through simple lenses[J]. *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, 2013, 32(5): 1-14.
- [19] LI W, LIU Y, YIN X, et al. A computational photography algorithm for quality enhancement of single lens imaging deblurring[J]. *Optik*, 2015, 126(21): 2788-2792.
- [20] 崔金林. 基于计算光学的非完善光学系统图像质量提高及其应用研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
CUI Jinlin. Study on improving image quality of imperfect optical system based on computational optics and its application[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2018.
- [21] LI W, YIN X, LIU Y, et al. Computational imaging through chromatic aberration corrected simple lenses[J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(20): 2211-2220.
- [22] SCHULER C J, HIRSCH M, HARMELING S, et al. Blind correction of optical aberrations[C]//*Proceedings of Computer Vision-ECCV 2012*. Florence, Italy: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 187-200.
- [23] TRIMECHE M, PALIY D, VEHVILAINEN M, et al. Multichannel image deblurring of raw color components[C]//*Proceedings of Computational Imaging III*. [S.l.]: SPIE, 2005, 5674: 169-178.
- [24] JOSHI N, ZITNICK C L, SZELISKI R, et al. Image deblurring and denoising using color priors[C]//*Proceedings of 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami, FL, USA: IEEE, 2009: 1550-1557.
- [25] 郑云达. 简单光学系统计算成像技术研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.

- ZHENG Yunda. Research on computational imaging technology of simple optical system[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2019.
- [26] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- ZHANG Yimo. Applied optics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
- [27] RODDIER F, THOMPSON L. Adaptive optics in astronomy[J]. *Physics Today*, 2000, 53(4): 69.
- [28] HARDY J W. Adaptive optics for astronomical telescopes[M]. Oxford, UK: Oxford Optical and Imaging Science, 1998.
- [29] ROGGMANN M C, WELSH B M. Imaging through turbulence[M]. Leiden, Netherlands: CRC Press, 2018.
- [30] VOGEL C R. Computational methods for inverse problems[M]. Philadelphia, US: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [31] LIANG Y, RAO C, LI M, et al. Iterative blind deconvolution of adaptive optics images[J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, 4(4): 187-188.
- [32] 赵振磊. 自适应光学图像复原算法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.
- ZHAO Zhenlei. Study on the algorithms of adaptive optical images restoration[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2009.
- [33] MUGNIER L M, CONAN J M, FUSCO T, et al. Joint maximum a posteriori estimation of object and PSF for turbulence-degraded images[C]//Proceedings of Bayesian Inference for Inverse Problems. San Diego, CA, USA: SPIE, 1998, 3459: 50-61.
- [34] MUGNIER L M, FUSCO T, CONAN J M. MISTRAL: A myopic edge-preserving image restoration method, with application to astronomical adaptive-optics-corrected long-exposure images[J]. *JOSA A*, 2004, 21(10): 1841-1854.
- [35] THIÉBAUT E, CONAN J M. Strict a priori constraints for maximum-likelihood blind deconvolution[J]. *JOSA A*, 1995, 12(3): 485-492.
- [36] CHRISTOU J C. Blind deconvolution post-processing of images corrected by adaptive optics[C]//Proceedings of Adaptive Optical Systems and Applications. San Diego, CA, USA: SPIE, 1995, 2534: 226-234.
- [37] GENG Z, CHEN B, XU Q, et al. Dynamic support region-based astronomical image deconvolution algorithm[C]//Proceedings of Adaptive Optics Systems. Marseille, France: SPIE, 2008, 7015: 737-746.
- [38] 陈波, 程承旗, 郭仕德, 等. 自适应光学图像非对称图像迭代盲复原算法[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(2): 313-318.
- CHEN Bo, CHENG Chengqi, GUO Shide, et al. Adaptive optical image asymmetric iterative blind restoration algorithm[J]. *Intense Laser and Particle Beams*, 2011, 23(2): 313-318.
- [39] 田雨, 饶长辉, 魏凯. 基于帧选择和多帧降质图像盲解卷积的自适应光学图像恢复[J]. *天文学报*, 2008, 49(4): 455-462.
- TIAN Yu, RAO Changhui, WEI Kai. Adaptive optical image restoration based on frame selection and blind deconvolution of multi-frame degraded images[J]. *Astronomical Journal*, 2008, 49(4): 455-462.
- [40] 李卫丽. 简单透镜成像系统图像复原方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- LI Weili. Study on image restoration method of simple lens imaging system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [41] CAI Y, WANG Z, LIANG Y, et al. Direct calculation of tightly focused field in an arbitrary plane[J]. *Optics Communications*, 2019, 450: 329-334.
- [42] TRUSSELL H, HUNT B. Image restoration of space variant blurs by sectioned methods[C]//Proceedings of ICASSP'78. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Tulsa, OK, USA: IEEE, 1978, 3: 196-198.
- [43] TRUSSELL H, HUNT B. Sectioned methods for image restoration[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1978, 26(2): 157-164.
- [44] JOSHI N, SZELISKI R, KRIEGMAN D J. PSF estimation using sharp edge prediction[C]//Proceedings of 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [45] SCHULER C J, HIRSCH M, HARMELING S, et al. Non-stationary correction of optical aberrations[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain: IEEE, 2011: 659-666.
- [46] ROIDER C, JESACHER A, BERNET S, et al. Axial super-localisation using rotating point spread functions shaped by polarisation-dependent phase modulation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4029-4037.
- [47] FU S, LI M, ZHOU L, et al. Deformable mirror based optimal PSF engineering for 3D super-resolution imaging[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(12): 3031-3034.
- [48] VIJAYAKUMAR A, KASHTER Y, KELNER R, et al. Coded aperture correlation holography—A new type of incoherent digital holograms[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12430-12441.

- [49] RAI M R, ROSEN J. Noise suppression by controlling the sparsity of the point spread function in interferenceless coded aperture correlation holography (I-COACH)[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24311-24323.
- [50] YU X, WANG K, XIAO J, et al. Recording point spread functions by wavefront modulation for interferenceless coded aperture correlation holography[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 409-412.
- [51] YASUKI D, SHIMOBABA T, MAKOWSKI M, et al. Hologram computation using the radial point spread function[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(28): 8829-8837.
- [52] YASUKI D, SHIMOBABA T, MAKOWSKI M, et al. Three-dimensional hologram calculations using blocked radial and windmill point spread functions[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 44283-44298.
- [53] DEWEERT M J, FARM B P. Lensless coded-aperture imaging with separable Doubly-Toeplitz masks[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(2): 023102.
- [54] ASIF M S, AYREMLOU A, SANKARANARAYANAN A, et al. Flatcam: Thin, lensless cameras using coded aperture and computation[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2016, 3(3): 384-397.
- [55] ADAMS J K, BOOMINATHAN V, AVANTS B W, et al. Single-frame 3D fluorescence microscopy with ultraminiature lensless FlatScope[J]. *Science Advances*, 2017, 3(12): e1701548.
- [56] TAJIMA K, SHIMANO T, NAKAMURA Y, et al. Lensless light-field imaging with multi-phased fresnel zone aperture[C]// *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. [S.l.]: IEEE, 2017: 1-7.
- [57] ANTIPA N, KUO G, HECKEL R, et al. DiffuserCam: Lensless single-exposure 3D imaging[J]. *Optica*, 2018, 5(1): 1-9.
- [58] BOOMINATHAN V, ADAMS J K, ROBINSON J T, et al. Phlatcam: Designed phase-mask based thin lensless camera[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, 42(7): 1618-1629.
- [59] FU Q, YAN D M, HEIDRICH W. Compound eye inspired flat lensless imaging with spatially-coded Voronoi-Fresnel phase [EB/OL]. (2021-09-28)[2024-02-01]. <https://arxiv.org/abs/2109.13703v1>.
- [60] FENG S, 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.
- [61] FREUND I, ROSENBLUH M, FENG S. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(20): 2328.
- [62] JUDKEWITZ B, HORSTMEYER R, VELLEKOOP I M, et al. Translation correlations in anisotropically scattering media [J]. *Nature Physics*, 2015, 11(8): 684-689.
- [63] GUO C, LIU J, LI W, et al. Imaging through scattering layers exceeding memory effect range by exploiting prior information [J]. *Optics Communications*, 2019, 434: 203-208.
- [64] BERTOLOTTI J, VAN PUTTEN E G, BLUM C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- [65] 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.
- [66] TANG D, 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.
- [67] ZHANG T, WANG X, ZHAO W, et al. Noninvasive imaging through scattering media with enlarged FOV using PSF estimations and correlations[J]. *Advanced Photonics Research*, 2023, 4(6): 2300100.
- [68] 曹玥, 辛煜, 赵琦. 基于解卷积透过散射介质大视场成像恢复方法[J]. *现代物理*, 2020, 10: 113.
CAO Yue, XIN Yu, ZHAO Qi. Large field of view imaging restoration method based on deconvolution through scattering media[J]. *Modern Physics*, 2020, 10: 113.
- [69] XIE X, ZHUANG H, HE H, et al. Extended depth-resolved imaging through a thin scattering medium with PSF manipulation [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4585.
- [70] LIAO M, LU D, PEDRINI G, et al. Extending the depth-of-field of imaging systems with a scattering diffuser[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 7165.
- [71] XIE J, XIE X, GAO Y, 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.
- [72] LIANG J, CAI J, XIE J, et al. Depth-resolved and auto-focus imaging through scattering layer with wavelength compensation [J]. *JOSA A*, 2019, 36(6): 944-949.
- [73] GREENGARD A, SCHECHNER Y Y, PIESTUN R. Depth from diffracted rotation[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2): 181-183.

- [74] GAO J, LIU H, HAN S. Three-dimensional positioning and imaging through scattering media based on the double-helix point spread function[C]//Proceedings of the Seventh Asia Pacific Conference on Optics Manufacture and 2021 International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (APCOM and YSAOM 2021). Hong Kong, China: SPIE, 2022, 12166: 1438-1445.
- [75] ANAND V, NG S H, MAKSIMOVIC J, et al. Single shot multispectral multidimensional imaging using chaotic waves[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 13902.
- [76] 李元铨, 翟爱平, 张腾, 等. 累加平均提升点扩散函数信噪比实现透过散射介质三维成像[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 85-91.
LI Yuancheng, ZHAI Aiping, ZHANG Teng, et al. Three-dimensional imaging through scattering media by improving signal-to-noise ratio of point spread function using cumulative average[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 85-91.
- [77] MCCABE D J, TAJALLI A, AUSTIN D R, et al. Spatio-temporal focusing of an ultrafast pulse through a multiply scattering medium[J]. Nature Communications, 2011, 2(1): 447.
- [78] MOUNAIX M, ANDREOLI D, DEFLENNE H, et al. Spatiotemporal coherent control of light through a multiple scattering medium with the multispectral transmission matrix[J]. Physical review letters, 2016, 116(25): 253901.
- [79] SAHOO S K, TANG D, DANG C. Single-shot multispectral imaging with a monochromatic camera[J]. Optica, 2017, 4(10): 1209-1213.
- [80] LU D, XING Q, LIAO M, et al. Single-shot noninvasive imaging through scattering medium under white-light illumination[J]. Optics Letters, 2022, 47(7): 1754-1757.
- [81] ZHANG Y, ZHANG X, TIAN H, et al. Monte Carlo study on polarization PSF for underwater imaging enhancement[C]//Proceedings of the Eighth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. Kunming, China: SPIE, 2022, 12169: 2821-2826.
- [82] SHI Y, LIU Y, SHENG W, et al. Imaging through motional scattering layers via PSF reshaping and deconvolution[J]. Optics Communications, 2020, 461: 125295.
- [83] SHUI Y, WANG T, ZHOU J, et al. Scattered light imaging beyond the memory effect using the dynamic properties of thick turbid media[J]. Advanced Photonics Nexus, 2023, 2(2): 026010.

作者简介:



乔敏达(2000-),男,博士研究生,研究方向:计算成像、散射成像和光学信号处理, E-mail: 22191110653@stu.xidian.edu.cn。



白林阁(2000-),男,硕士研究生,研究方向:散射成像和图像处理。



王书恒(2001-),男,硕士研究生,研究方向:计算成像和散射成像。



王天宇(1998-),男,博士研究生,研究方向:光学超分辨率成像和合成孔径成像。



董雪(1994-),女,准聘副教授,硕士生导师,研究方向:新体制高光谱成像技术。



相萌(1990-),女,准聘副教授,硕士生导师,研究方向:计算成像、超分辨率成像和偏振散射成像。



刘飞(1986-),男,教授,博士生导师,研究方向:计算成像。



刘金鹏(1993-),通信作者,男,副研究员,华山准聘副教授,硕士生导师,研究方向:强对抗环境下计算成像, E-mail: liujinpeng@xidian.edu.cn。



邵晓鹏(1973-),男,教授,博士生导师,研究方向:计算成像。

(编辑:张黄群)