

计算光学成像系统测算提速方法综述(特邀)

刘正君^{1**}, 周旭阳^{1*}, 温秀², 李语童¹, 刘树田¹¹哈尔滨工业大学物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;²天津工业大学物理科学与技术学院, 天津 300387

摘要 为克服扫描计算成像系统测量和计算速度慢的缺点,综述一些快速计算成像技术,从测量和计算方面论述提高速度的方法。在基于光场调制的计算光学成像法中,介绍轴向扫描、横向扫描、多波长扫描、散射介质、多距离等调制方式。针对快速定量相位成像技术,介绍定量相位成像方法、基于 Kramers-Kronig 关系的快速定量相位成像方法、基于对角扩展采样的计算成像方法、基于对称照明的单帧计算成像方法。针对自动聚焦技术,介绍自动聚焦技术分类、核心算法、基于 Tanimoto 系数和多相梯度绝对值的自动聚焦方法、基于特征区域提取和细分搜索的快速自动聚焦方法。

关键词 计算光学成像; 调制成像; 定量相位成像; 自动聚焦

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232366

Review of Methods for Enhancing Measurement and Computation Speeds
in Computational Optical Imaging Systems (Invited)Liu Zhengjun^{1**}, Zhou Xuyang^{1*}, Wen Xiu², Li Yutong¹, Liu Shutian¹¹School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;²School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China

Abstract To overcome the disadvantages of slow measurement and computation in scanning computational imaging systems, this paper summarizes several rapid computational imaging techniques and introduces methods for enhancing measurement and computation speeds. It delves into computational optical imaging methods based on light field modulation, highlighting various approaches such as axial scanning, transverse scanning, multiwavelength scanning, scattering media, and multidistance techniques. Furthermore, it explores fast quantitative phase imaging techniques, including the standard quantitative phase imaging method, rapid variant based on the Kramers-Kronig relation, computational imaging method using diagonal spread sampling, and single-frame computational imaging method employing symmetrical illumination. Additionally, it covers autofocus technologies, detailing the classification of autofocus technology, its core algorithms, the autofocus method based on the Tanimoto coefficient and the absolute value of the polyphase gradient, and the rapid autofocus method based on feature region extraction and subdivision search.

Key words computational optical imaging; modulation imaging; quantitative phase imaging; automatic focusing

1 引言

随着多尺度成像技术的快速发展,分辨率和视场作为重要技术指标得到研究人员和重要用户的极大关注。受当前硬件和微纳加工技术水平的限制,成像分辨率很难继续提高。对于成像视场,如果成像时间不限,扫描方式可无限扩展视场。空间带宽积作为更有效的系统性能评估量,综合考虑视场和分辨率,可用于

衡量成像设备捕获信息通量的能力。对于快速成像或瞬态过程成像,留给成像系统的数据获取时间是有限的或者是很短的。因此,成像速度也是考量显微成像系统性能的重要技术指标。它们结合可以评价显微成像系统获取时空($2D+t$)信息的能力。发展具有快速高通量成像能力的显微成像系统是需求迫切的研究任务,对观察大尺寸目标动态(瞬态)过程和在线检测等实际应用具有重要理论意义和经济效益。

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2023-11-30; 录用日期: 2023-12-21; 网络首发日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61975044, 12374271, 62375065, 12074094)、哈尔滨工业大学医工理交叉基金(IR2021237)

通信作者: *xyzhou0508@163.com; **zjliu@hit.edu.cn

研制快速高通量显微成像系统需要应用计算光学成像技术衔接超分辨显微成像理论和显微系统硬件,实现软硬件组合从而完成高质量显微成像目标。借助数学和算法方面的独特优势与潜力,将计算光学成像技术用于计算光学成像系统,对芯片和电子产品面板等高端制造业的快速检测具有重要战略意义。

近年来,空频域扫描方案对利用计算显微成像技术提高视场和分辨率具有重要推动作用,相应地涌现很多研究成果。鉴于扫描测量方式会影响成像速度,多种并行测量方式相继出现,比如空间多路技术、多波长照明等方法,它们可实现单次曝光,一次性获取目标经光学显微成像系统的投影信息。因此,并行测量方法是发展快速计算显微成像的可行技术路线。

本文介绍计算光学显微成像技术在测量和计算方面加速的新进展,包括在视场、分辨率、测算加速、自动聚焦等方面的新方法。通过一维扫描方式实现降维测量,加速成像系统的测量和计算。加权迭代相位恢复在含噪声的相干衍射成像系统中可显著改善迭代计算的收敛速度。对于叠层扫描成像技术,发展并行计算可实现计算速度的数倍提高。在傅里叶叠层成像技术中,应用 Kramers-Kronig 关系建立的复数因果律而实现相位分布的非迭代重构可显著提升该计算成像技术的测量和计算速度。针对相干衍射成像系统,应用自动聚焦技术可实现各衍射平面位置的快速精确测算,提高图像重构质量。

2 计算光学成像技术进展

随着光学系统的离散化,如图 1 所示,计算成像技术发展迅速。这里列举并分析计算光学显微成像技术在高通量成像方面的相关研究进展情况,归纳视场、分辨率、快速成像方面的部分成果。

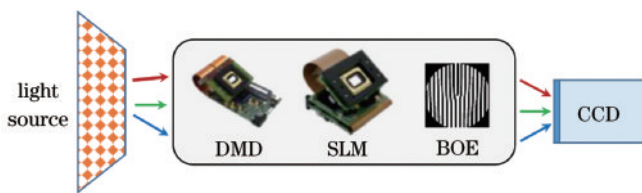


图 1 光学成像环节的离散化

Fig. 1 Discretization of the optical imaging process

2.1 傅里叶叠层成像技术

空域扫描和叠层扫描为成像系统视场改善带来极大帮助^[1-2]。在待测样品表面信息不变或者扫描过程不变情况下,扫描方法可获得很大视场,同时叠层扫描成像可获得目标表面的光场复值信息。偏振敏感的傅里叶叠层扫描显微技术具备高分辨率、宽场双折射成像能力^[3]。在便携型光学显微系统设计方面,智能手机参与组成的计算显微成像系统在空间带宽积方面可超过普通台式显微镜,具有彩色复值成像能力^[4]。根

据倾斜照明设计的计算显微系统为扩大视场和提高分辨率提供新途径^[5]。可去除伪影^[6]的傅里叶叠层扫描技术具有非迭代、高并行度计算能力、容错性强等特点。智能校正技术^[7-8]使傅里叶叠层扫描显微成像系统的性能更加稳定。

2.2 并行测量与计算技术

合成孔径干涉^[9]是设计高分辨大视场定量相位显微成像的有效技术。多光束阵列干涉显微技术^[10]打破了数字全息显微技术的局限性,其主要优势是可集成更多波前,时间稳定性更高。结合部分相干光的固有相干选通特性和倾斜照明的成像方式^[11]可显著增加空间频率带宽,具备非常可观的成像视场。横向平移方法^[12]可生成大视场中的高分辨散斑照明图案,含优化算法的图像重建方案对未知照明图案、系统像差和图案平移等缺陷完成必要数字校正。基于非干涉合成孔径的强度衍射层析成像技术^[13]具有分辨率高、对比度大、层析能力强等特点。多视角和多深度的测试方法^[14]是具有很大潜力的并行测量方案。由多芯光纤和压缩感知组合的显微成像系统^[15]具有很大的空间带宽积。基于光子筛的双振幅成像方法^[16]利用 Pancharatnam-Berry 相位实现偏振和波长调控,可维持空间带宽积不变。

2.3 高通量显微成像技术

基于混合明-暗场强度传输方程设计的高通量显微技术^[17]可合成高分辨率和大视场的复值图像。光学相干显微技术与混合自适应光学方法^[18]结合,引入超快速扫描源后可获得更高的时空带宽积。在两步相移干涉技术中,串联光学结构^[19]可充分利用相机空间带宽积提高分辨率。在光学元件集成方面,基于光学不变量的设计方案^[20]可最大化显微成像系统的空间带宽积。采用平面-曲面-平面的显微成像技术^[21]具有高时空分辨率和海量数据处理能力,待测样本平面被放大至较大球面图像,可获得普通成像系统无法具备的分辨率和视场,超越衍射成像极限^[22]。针孔型全息成像技术^[23]采用运动阵列微透镜和高分辨图像阵列编码,具有可观的空间带宽积和分辨率。为实现图像传感器芯片和物镜的最佳匹配,散焦图像可充分利用物镜的空间带宽积^[24]。采用单次测量的离轴数字全息显微成像技术^[25]在空间带宽积方面提供光学成像系统的优化框架。离轴全息成像技术^[26]以牺牲空间分辨率或视场为代价,使用白光照明完成单次曝光成像,在高时域带宽实现对相位目标的快速测量。

2.4 基于多波长照明的显微成像技术

基于波长扫描的超分辨成像方法^[27]可取代实现物理位移的成像硬件单元,提高宽场成像系统的分辨率,显著增加空间带宽积。基于单像素成像的全色光场显微技术^[28]可增加空间带宽积,提高重建光场的空间分辨率。基于单次曝光的强度衍射层析成像技术^[29]采用环形可编程的彩色发光二极管,提供与物镜数值孔径

精确匹配的倾斜照明空间布置方案,具备无标记、高通量和快速的成像能力。基于波长扫描的宽视场定量相位成像方法^[30]提供克服空间信息混叠的解决方案,形成多样性充足的衍射信息。由图案化的石墨烯夹层结构和射频探测器组成的光学透明亚表面^[31]可实现自适应频率操纵以匹配入射光束,为多色照明成像提供切实可行的光源设计与调控方案。

2.5 快速计算成像方法的进展

在图像重建方面,计算光学成像技术为快速图像生成提供灵活性高、可塑性高的技术支持^[32-33]。Kramers-Kronig 关系^[34]将强度分布转换为相位分布,实现非迭代相位恢复计算^[34]、空间带宽积增大^[35]、图像重建计算量降低^[36]。广义离散傅里叶-汉克尔变换^[37]可实现高效基向量分解,减少计算量,适用于麦克斯韦鱼眼透镜、球形隐身斗篷、非球面薄透镜和柱面透镜等光束调制与成像光学元件的数学建模。自适应采样计算方法^[38]可在成像系统中降低计算复杂度,有效而充分地利用空间带宽积信息。多波长相位恢复方法^[39]结合物理约束和稀疏性先验信息,保证在测量过程存在噪声情况时的显微成像质量。在非相干数字全息显微系统中,基于随机并行梯度下降的自适应方法^[40]具有并行计算多种像差和快速收敛的优点。

3 基于光场调制的计算光学成像

基于光场调制的计算光学成像方法通过改变系统参数获得更多的定解数据,使得图像重建过程有更多可以依赖的约束数据,一些迭代算法的收敛性得以改善。在相干衍射成像技术中,需要测量多幅衍射图,导致测量相对耗时,相应图像重构计算也需要大量时间。关于测算加速方面的研究对这些成像技术是非常重要的。传统单帧成像方法,例如 Gerchberg-Saxton(GS)算法^[41]、混合输入输出(HIO)算法^[42]等,需要已知物面支撑约束或者其他先验信息才能实现清晰成像。在实验条件下,该方法难以准确获取先验信息,不仅实验难度大,成像质量也无法保障。基于优化方案的新型单帧相位恢复算法结构复杂、计算耗时严重、可靠性差。为提高计算光学成像的质量,多帧成像方法得以充分发展。多帧扫描成像不要求空间域的物理约束和样本先验信息。

计算光学成像系统分为光学编码和数字解码两个模块。为提高成像质量,在光学编码模块采用光学调制,增加样本信息的多样性,通过记录经光学系统调制的数据,能有效消除孪生像、减少噪声、提高分辨率。在光学编码阶段,对样本的光学信息进行调制,使得相机记录的每张强度图像包含的样本信息都有差别,利用信息的冗余性和多样性进行相位恢复。根据光学编码系统对样本调制方式的差异,光学调制成像技术主要包括轴向扫描调制成像、横向扫描调制成像(叠层扫描成像)、多波长扫描调制成像和散射介质调制成像等。

3.1 轴向扫描调制成像

轴向扫描调制成像方法通过将样本或相机沿光轴扫描以记录多张强度图像,降低相位恢复迭代计算的复杂度,成像系统如图 2 所示。由于衍射距离改变,波前相位信息随之变化。利用相机记录不同衍射距离的衍射强度图像,相位恢复算法利用一组投影图数据可重构样本的复振幅信息。

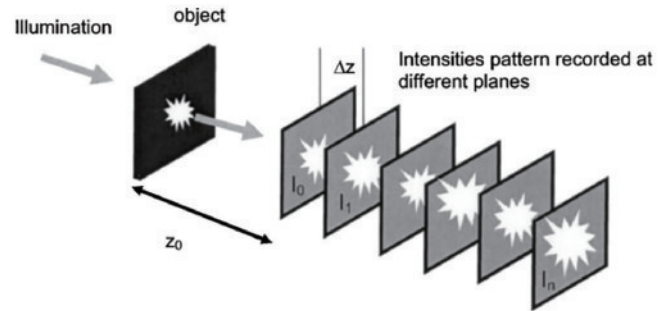


图 2 轴向扫描调制成像原理示意图^[43]

Fig. 2 Schematic of axial scanning modulation imaging principle^[43]

在相干光照明下,样本的衍射图像投影到成像传感器上被记录。成像传感器最初位于距离样本 z_0 处,完成衍射强度图 I_1 记录后,将传感器沿光轴移动 Δz 并记录强度 I_0 。重复上述过程,获得足够数量的强度图像。初始距离 z_0 、扫描步长 Δz 以及衍射强度图数量需要根据样本的大小和类型选择。通常,对于几毫米大小的样本, z_0 和 Δz 一般在毫米范围内。在样本图像重构过程中,轴向扫描调制成像相位恢复算法可选用两种模式:串行计算和并行计算。

2005年, Pedrini 等^[43]提出单光束多强度相位重构(SBMIR)方法。作为串行计算模式,在 SBMIR 计算重构中,首先将样本的复振幅传递到第一个记录平面,然后保持波前的相位不变,利用采集到的强度图替代振幅信息进行振幅约束,将更新后的图像传递到下一个平面。当在最后一个平面完成振幅约束后,将图像逆传递到样本平面,得到更新后样本图像。重复上述过程,直至迭代结果满足收敛条件。串行计算模式具有很快的收敛速度,但由于串行计算过程中误差会累积,很容易受到噪声干扰,鲁棒性较差。

2015年, Liu 等^[44]提出具有并行计算模式的轴向扫描相位恢复算法,即振幅-相位恢复(APR)算法。APR 算法将样本的复振幅信息同时传递到所有记录平面,进行振幅约束后,将更新后的波前逆传递回样本平面。在样本平面,对多个更新的样本复振幅取均值操作,最终得到当前轮迭代后的样本图像,采用取均值的数据处理方法可有效减少噪声对成像的影响,因而具有更好的鲁棒性。

2019年, Buco 等^[45]提出基于自适应支撑约束的增强多平面相位恢复算法。该方法将自适应支撑约束集

成到 SBMIR 算法中,在计算过程中增强衍射距离最近的成像平面与样本平面之间的传播,可实现更快的收敛速度和更高的重构精度。为解决轴向扫描调制成像中收敛速度慢和收敛停滞的问题,2019 年, Binamira 等^[46]提出使用无序传播序列的相位恢复算法。不同于 SBMIR 中不同平面间顺序传播方式,该算法在不同平面间采用无序传播策略,如图 3 所示。该技术的主要优点是振幅变化的显著增加,振幅变化是成功迭代相位恢复的关键和必要因素。对于 N 个平面,实现传播序列的可能方法的数量增加了 $N!(N-1)!$,为幅度的变化提供多样性。

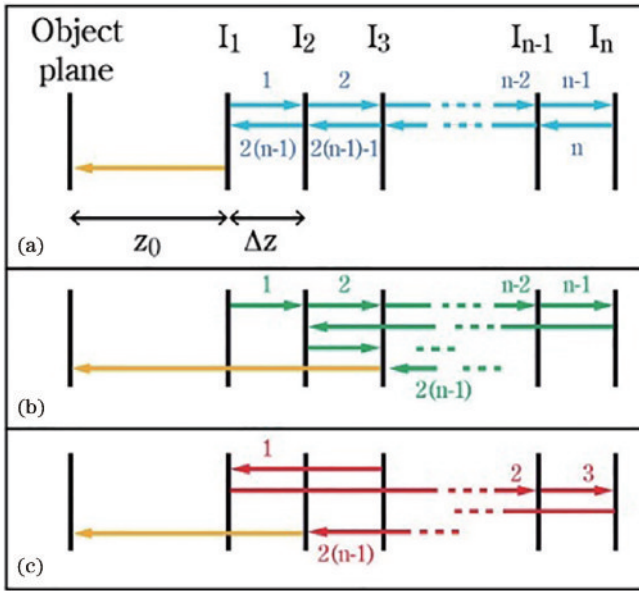


图 3 三种算法序列^[46]。(a)有序 SBMIR; (b)半有序半无序 SBMIR; (c)无序 SBMIR
Fig. 3 Three kinds of algorithm sequences^[46]. (a) Ordered-SBMIR; (b) half-ordered half-unordered SBMIR; (c) unordered-SBMIR

在轴向扫描调制成像系统中,需要轴向地移动样本或者相机,这样不可避免地会引入横向位置漂移误差。这将导致不同衍射强度图隶属于不同的光轴,如果在相位恢复之前不进行矫正,会导致图像重构失败。此外,轴向扫描调制成像系统中相机采集到的是照明背景光和样本出射光的干涉图像。在计算过程中,轴向扫描调制成像将照明背景作为样本的组成部分进行重构,当测量对象为无标记的生物样本时,受照明背景干扰,导致图像的对比如较差,成像质量变低。

3.2 横向扫描调制成像

2004 年, Rodenburg 等^[47-48]提出叠层扫描成像技术 (PIE),该技术理论上可实现无限大视场成像。图 4 为 PIE 的系统结构示意图,其成像系统主要包括光源、孔径光阑、样本和成像传感器。将孔径光阑置于样本前方,控制照射在样本表面照明光束的大小。因为当不使用孔径光阑限制照明光束的大小时,衍射效果不明

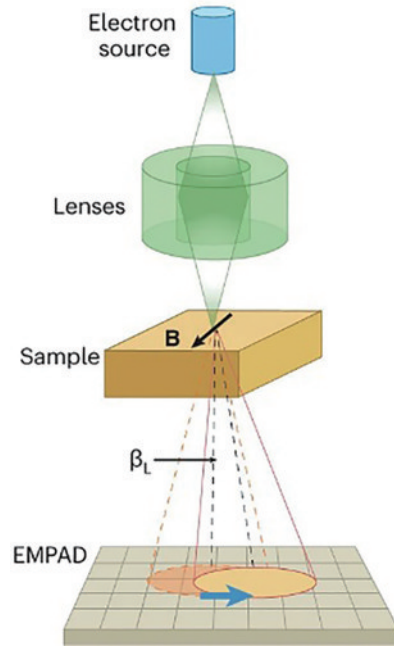


图 4 横向扫描调制成像系统示意图^[49]

Fig. 4 Schematic of transverse scanning modulation imaging principle^[49]

显,无法得到有明显衍射级次的强度图。当获取大量信息后,可得到足够多的定解方程,可计算出样本信息。在图像采集过程中,将孔径光阑或者样本放在二维移动平台上,使其在垂直于光轴的平面内移动,即使用孔径受限的照明光斑对样本进行二维扫描,要求相邻扫描位置有重叠。利用采集到的强度图像计算样本复振幅信息。

PIE 算法的前提条件是已知照明光束在样本前表面的空间分布,但在实际实验条件下难以提前获得精度较高的照明光斑。2009 年, Maiden 等^[50]提出扩展叠层扫描成像技术 (ePIE),该技术在迭代过程中能够同时更新样本函数和照明光束函数。2017 年, Maiden 等^[51]提出正则化叠层扫描成像技术 (rPIE)。该技术将低阶组合状态概念引入叠层扫描成像的求解过程中,对代价函数进行微小改变,在物函数求解公式中添加正则项。通过匹配合适的正则系数,该技术拥有更快的收敛速度,对照明光斑初始化要求也更为宽松。

为加速叠层扫描成像,2015 年, Sidorenko 等^[52]提出单次曝光成像方法。该方法中,照明光经过一个透镜阵列,根据透镜的几何光学特性,每个透镜下的照明光束都在样本表面重叠阵列分布,如图 5 所示,因为在样本和相机间放置透镜,透镜阵列的各透镜将光束会聚样本区域从而光束投射到相机的不同成像区域。在单次曝光中,所得图像包含几十甚至几百张衍射强度图,克服了叠层扫描成像因连续扫描造成的耗时、振动不稳定和漂移等缺陷。实验结果表明,该方法在 180 ms 的曝光时间内可得到 49 张互相重叠的样本图像。2020 年, Wen 等^[53]提出拥有公共约束的并行计算策

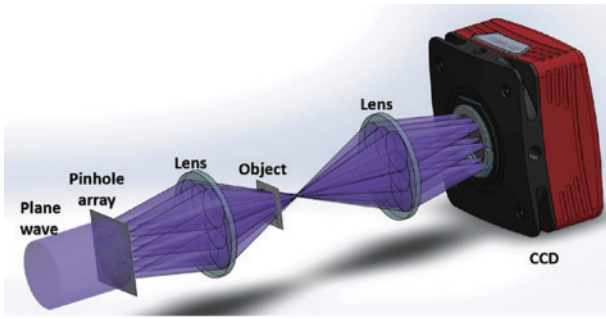


图 5 基于透镜阵列的单次曝光叠层扫描成像系统^[52]
Fig. 5 Single-shot ptychographical setup with pinhole array^[52]

略,有效消除并行计算带来的子图像间的相位差,大幅减少算法重构时间,提高成像速度。当将数据分成 8 组同时进行重构时,若数据量足够大,则算法计算时间约为原来的 1/8。

2021 年,Chang 等^[54]提出利用高倾斜照明光束的单次曝光成像技术,如图 6 所示。使用具有足够大传播角的激光束簇照射厚样品,相机在单次曝光情况下记录多幅彼此具有明显间隔的衍射图像。该技术通过改变相干传递函数,传播非傍轴光束,可获得高分辨的三维图像。此外,使用高倾斜的照明可以减少相邻衍射图像之间的串扰,获得更多高频分量。

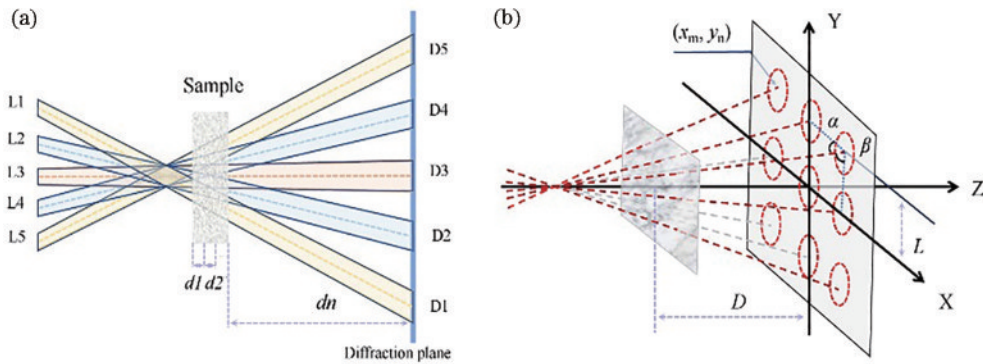


图 6 高度倾斜照明的单曝光三维成像原理^[54]。(a)多束照明光同时照射样本;(b)成像平面多张图像分布
Fig. 6 Schematic of 3D single-shot ptychography with highly tilted illuminations^[54]. (a) Multiple beams of illumination simultaneously illuminate the sample; (b) distribution of multiple images in the imaging plane

2022 年,Wen 等^[55]提出基于锥形螺旋扫描的无透镜成像方法。每移动扫描一次,衍射强度图案同时得到三个方向的调制,成像系统示意图如图 7 所示。该方法结合了轴向扫描调制成像和叠层扫描成像的优点:轴向移动给记录的图案带来更丰富的多样性信息,

这有助于去除孪生图像,加快算法收敛速度,用少量数据完成大视场成像;物体在无空间约束的照明光下得到横向扫描,提供了叠层扫描成像中图像重叠冗余的特点,能够同时重构照明光束与样本图像,抑制照明光束对样本信息的不良影响。

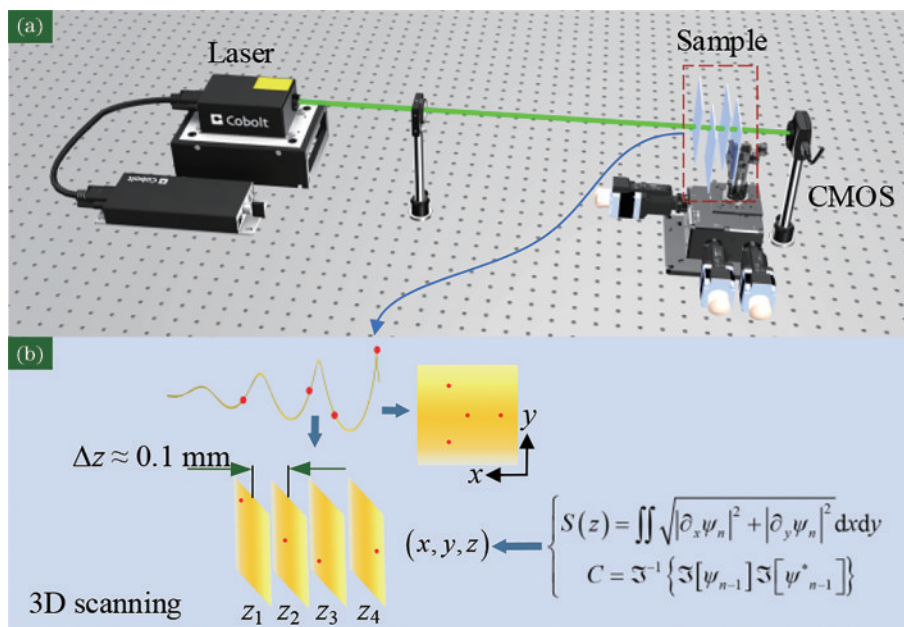


图 7 三维锥形螺旋扫描成像示意图^[55]。(a)实验装置;(b)样本移动轨迹
Fig. 7 Schematic of 3D conical spiral scanning imaging^[55]. (a) An experimental setup; (b) sample shifting route

3.3 多波长扫描调制成像

多波长扫描调制成像采用多波长光源进行照明,利用波长的多样性进行相位恢复,计算收敛速度快,对噪声和环境干扰具有很强的抗干扰性。在多波长扫描成像系统中,光谱带宽和色散校正对高分辨率重建至关重要。2021年,Liu等^[56]提出具有自适应色散校正的多波长无透镜衍射成像方法,如图8所示。对应不同波长光源,准直透镜的折射率会发生变化。该方法采用 Sellmeier 公式,计算不同波长下准直透镜的等效焦距,获取不同衍射图的波长调制函数;仅使用三束

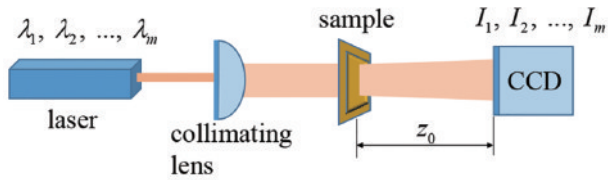


图8 色散校正多波长扫描成像系统^[56]
Fig. 8 Dispersion correction multi-wavelength scanning imaging system^[56]

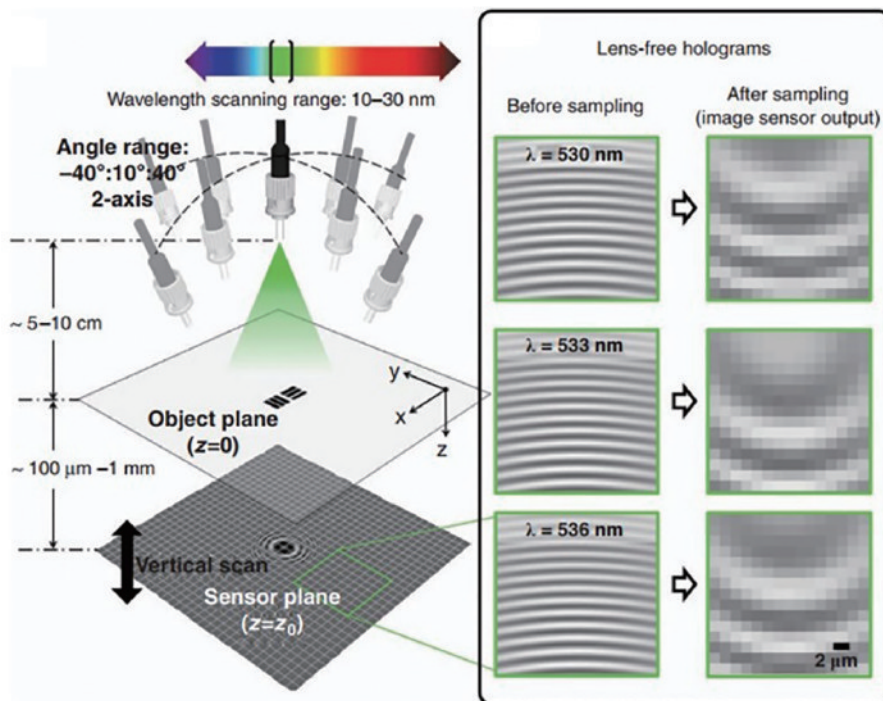


图9 基于波长扫描的超分辨实验系统^[27]
Fig. 9 Super resolution experimental system based on wavelength scanning^[27]

多波长扫描调制成像技术不需要机械移动,但对光源提出要求,要发出不同波长的光束,增加成像系统的成本。由于不同波长对应不相等的极限分辨率,目前缺乏合理计算方法,该技术不能实现更高成像分辨率。

3.4 散射介质调制成像

2016年,Zhang等^[57]提出一种相干调制成像相位恢复算法。将一个由随机分布钨柱组构成的调制元件

同波长的光束即可实现高分辨、高鲁棒性成像;将自动聚焦技术与迭代计算相结合,成功地实现色散校正。针对相位包裹问题,传统多波长相位恢复算法需要额外计算进行相位解包裹,增加了算法复杂性。为解决这一问题,2022年,Gao等^[39]提出基于投影折射率框架的多波长相位恢复算法。该算法在相位恢复算法中引入相位解包裹,将多波长相位恢复视为最优化问题,采用 total variation (TV) 正则化方法可直接恢复物体的振幅和无包裹相位。

对于叠层扫描成像技术,数据冗余性是图像重构成功的关键,但是冗余性会导致数据量大、成像速度慢。尽管单次曝光成像技术能减少数据采集时间,通道混叠等原因会导致最终成像分辨率下降。2016年,Luo等^[27]提出基于波长扫描的像素超分辨成像技术,如图9所示。多波长能够提高宽场成像系统的分辨率,显著增加空间带宽积。利用窄光谱范围(例如10~30 nm)内多个波长记录的低分辨衍射图像,该技术将波长扫描像素超分辨与合成孔径方法相结合重构超分辨图像。

放在样本和相机之间,改变传统相干衍射成像中样本和测量数据之间的傅里叶变换关系,如图10所示。仅需要松弛的支撑约束,该相位恢复算法即可实现快速收敛。波前调制器可以显著降低中心光束的强度,使得光子能更均匀地分布在探测器上,降低探测器的动态范围要求。

2022年,Song等^[58]提出一种基于掩模调制的相干衍射成像相位恢复算法。图11为掩模调制相干衍射

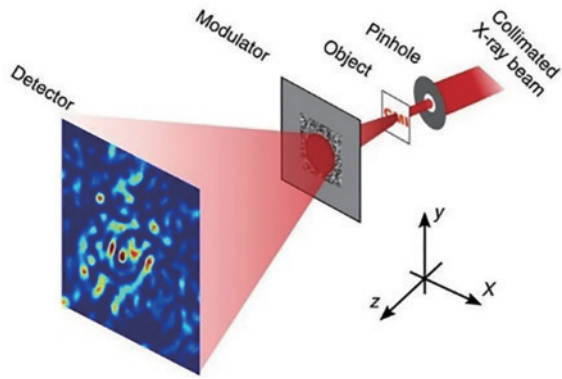


图 10 相干调制成像系统^[57]

Fig. 10 Coherent modulation imaging system^[57]

成像系统,在物平面前方设置双针孔,将相干光分成两条路径。物平面上的一个区域在成像过程中始终保持不变,提供静态区域,这可以在物平面提供有效和可靠的约束条件。而物平面上的另一部分是动态的成像区域,成像传感器在远场捕获傅里叶强度图像。掩模调制相干衍射成像系统将更多的先验知识用于相位恢复,可提高重建精度、鲁棒性和速度。

2019年,Wu等^[59]研究波前成像传感器,利用空间光调制器(SLM)代替传统成像传感器中的微透镜阵

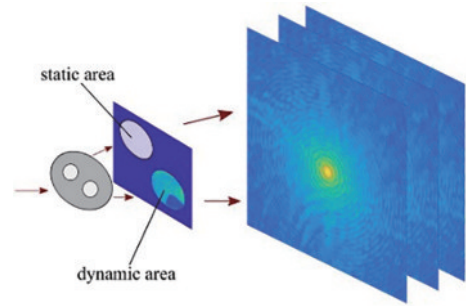


图 11 掩模调制相干衍射成像系统^[58]

Fig. 11 Mask-modulated coherent diffraction imaging system^[58]

列,对样本光学信息进行调制,利用相位恢复算法计算入射波前,大幅提升成像分辨率,如图 12 所示。2022年,Xu等^[60]提出基于振幅调制的相位恢复算法,利用 SLM 上随机二进制掩模板对物体波前进行调制,仅需要 4 幅衍射强度图,就可以获得很快的收敛速度和很高的分辨率。基于 SLM 调制成像原理,Yu等^[61]提出虚拟点扩散函数概念,使得成像分辨率不再受孔径光阑的截止频率限制。在散射介质调制成像技术中,相机记录散斑与样本的叠加信息,采用相位恢复算法难以将它们完全分开,需要预先测量出散斑分布信息,这会增加实验系统负担。

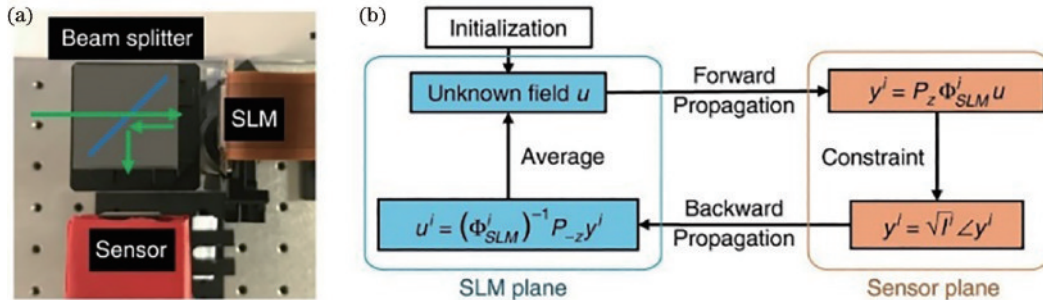


图 12 空间光调制器调制成像原理^[59]。(a)实验装置;(b)计算过程

Fig. 12 Modulation imaging principle of spatial light modulator^[59]. (a) Experimental setup; (b) calculation process

3.5 多距离相干衍射成像系统的优化记录方案

多距离相干衍射成像技术常通过高精度位移台和 CCD 等间隔记录衍射图像并将其作为重构算法的输入。等间隔记录方式会导致重建过程中收敛缓慢或停滞^[62]。由于光学系统误差,重构过程中将高精度位移台的移动位距离作为衍射距离真值用于图像重构会导致不清晰的重构结果。因此,设计图 13 所示的变间隔记录方式^[63]。II-4 为记录间隔变大的 4 幅衍射图像;EI-4 为等间隔记录的 4 幅衍射图像;EI-8 为等间隔记录的 8 幅衍射图像。衍射距离逐渐增大的记录方案可有效抑制重建图像噪声,提高重建质量。

4 快速定量相位成像

迭代相位恢复算法是已知光波强度信息进行反演求逆的过程,需要迭代逐渐收敛至物函数真实值。一

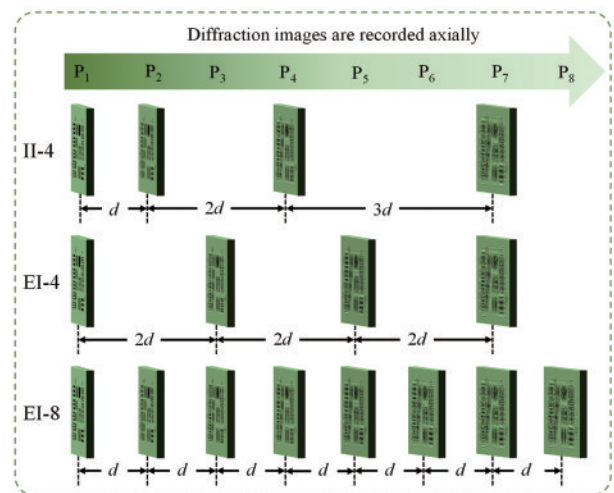


图 13 衍射图像采集方案^[63]

Fig. 13 Diffraction image acquisition scheme^[63]

些算法容易陷入局部极小值,算法不稳定、迭代重构时间过长。频域扫描、空域扫描等成像方式结合迭代相位恢复算法后,需要考虑频域空域支撑约束、保证相邻子孔径重叠率足够高,存在采集数据量大的问题。

4.1 定量相位成像方法

2021 年, Park 等^[34, 64]将空间 Kramers-Kronig 关系^[65]应用于离轴全息成像,将空间强度变化转为空间相位变化,通过倾斜照明频谱拼接,有效提升空间带宽积。对于衍射受限光学系统,物函数实虚部构成因果律,已知其一可根据空间 Kramers-Kronig 关系得到对偶量的计算结果。该方法不需要迭代过程,也不需要严格的约束,为各种光谱下的非迭代全息成像开辟了新途径。然而非迭代离轴全息术依旧需要高度相干性的光源进行干涉,额外引入的参考光路对测量环境要求十分苛刻。同年, Shen 等^[66]将空间 Kramers-Kronig 关系引入孔径扫描成像,通过空间光调制器改变频谱子孔径位置捕获低分辨率图像,进一步通过因果律获得相位信息,在频域实现高分辨成像。然而整个过程引入机械扫描测量,限制了系统的动态成像能力。2022 年, Lee 等^[67]提出基于空间 Kramers-Kronig 关系的单帧全场形貌测量,通过彩色相机单帧成像将高分辨相位转换为样品高度信息。

现阶段计算显微成像技术存在结构复杂、计算量大、迭代时间长、数据量大、成像效率低、采样标准模

糊、动态观测效果差等问题,严重制约其发展和应用。寻求低成本、大视场、高空间分辨率、高时间分辨率定量相位成像方法是当前计算成像发展趋势。基于傅里叶叠层扫描^[2]的快速定量显微成像技术仍存在无法实现快速定量非迭代的高质量成像、频谱欠采样影响重构质量、测量效率低不适用于动态成像等问题。围绕上述问题,基于 Kramers-Kronig 关系的快速显微光场成像技术主要对快速定量显微成像、切趾频谱约束、基于对角扩展采样的计算成像、基于对称照明的单帧计算成像问题进行研究,实现非迭代测算相位分布函数,极大提高定量相位成像速度。

4.2 基于 Kramers-Kronig 关系的快速定量相位成像

基于空域 Kramers-Kronig 关系的环形照明定量相位成像(AIKK)只须用商业 LED 阵列替换光源和聚光镜^[68],可实现对传统明场显微镜低廉硬件改造,如图 14 所示。环形照明成像算法流程由前向通道模型和基于 Kramers-Kronig 关系的重建算法两部分组成。假设样本物函数 $o(r)$,其中 $r=(x, y)$ 表示样本物平面的二维笛卡儿坐标系。环形照明成像法中 4 个 LED 单元的频域坐标为 $k_m=(2\pi \sin \theta_{xm}/\lambda, 2\pi \cos \theta_{ym}/\lambda)$, $m=1, 2, 3, 4$,其中 $(\theta_{xm}, \theta_{ym})$ 表示倾斜照明角度, λ 是波长。经过样本的透射光波场 $e(r)=o(r)e^{-ik_m r}$ 。根据傅里叶相移定理,空域倾斜照明角度转换为子频谱线性平移 $O(k-k_m)$,可表示为

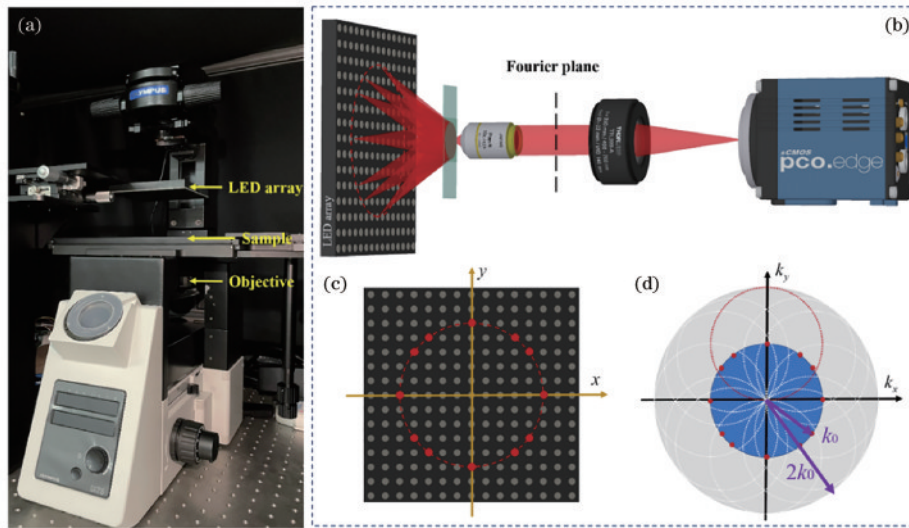


图 14 基于 Kramers-Kronig 关系的快速定量相位成像方法原理^[68]。(a) 环形照明成像法实验装置; (b) 实验装置示意图; (c) 环形照明; (d) 对应图 14(c) 的频谱分布

Fig. 14 Schematic of the fast quantitative phase imaging method based on Kramers-Kronig relationship^[68]. (a) Experimental setup of annular-illumination quantitative phase imaging; (b) schematic of experimental setup; (c) annular illumination; (d) Fourier coverage corresponding to Fig. 14(c)

$$G_m(k-k_m)=O(k-k_m)P(k)。(1)$$

由于零序项的存在,每个子频谱 $G_m(k-k_m)$ 可拆为分离样本函数 $\tilde{G}_m(k)$ 和 $\delta(k-k_m)$ 函数,后者位于圆孔子频谱的边缘。用倾斜照明采集的低分辨率强度图像 $I_m(r)$ 可等效为

$$I_m(r)=\left|\mathcal{F}^{-1}\{G_m(k-k_m)\}\right|^2=\left|\mathcal{F}^{-1}\{G_m(k)\}\right|^2=\left|\mathcal{F}^{-1}\{\tilde{G}_m(k)+\delta(k-k_m)\}\right|^2。(2)$$

Kramers-Kronig 关系可用于描述二维函数 $\chi(r)$ 的实部和虚部之间的内在关联,即

$$\begin{cases} \text{Re} [\chi(r)] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\text{Im} [\chi(r')] }{r' - r} dr' \\ \text{Im} [\chi(r)] = -\frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\text{Re} [\chi(r')] }{r' - r} dr' \end{cases}, \quad (3)$$

式中: P 为柯西主值。

定义两个函数: 样本函数 $S(\vec{r}) = \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{G}_m(k)\}$ 和 δ 函数 $D(\vec{r}) = \mathcal{F}^{-1}\{\delta(k - k_m)\} \approx e^{-ik_m r}$ 。式 (2) 可简化为 $I(\vec{r}) = |S(\vec{r}) + D(\vec{r})|^2$, 得到

$$\frac{I(\vec{r})}{|D(\vec{r})|^2} = \left| \frac{S(\vec{r})}{D(\vec{r})} + 1 \right|^2, \quad (4)$$

取对数, 得

$$\log \left| \frac{S(\vec{r})}{D(\vec{r})} + 1 \right| = \frac{1}{2} [\log I(\vec{r}) - \log(|D(\vec{r})|^2)]. \quad (5)$$

设复函数 $X = \log \left(\frac{S(\vec{r})}{D(\vec{r})} + 1 \right) = \text{Re} [X] + i \text{Im} [X]$ 。

X 的实部和虚部可转换为

$$\begin{cases} \text{Re} [X] = \frac{1}{2} [\log I(\vec{r}) - \log(|D(\vec{r})|^2)] \\ \text{Im} [X] = -i \mathcal{F}^{-1}\{\text{sgn}(k_m \cdot k_{\parallel}) \mathcal{F}\{\text{Re} [X]\}\} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: k_{\parallel} 为平行分量, $k_{\parallel} = k_m / |k_m|$; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。4 个子孔径频谱分布可转换为

$$\tilde{G}_m(k - k_m) = \mathcal{S}\{\mathcal{F}[S_m(\vec{r})]\}, \quad m = 1, 2, 3, 4, \quad (7)$$

式中: $\mathcal{S}(\cdot)$ 是一个移位算子, 将子频谱移回到它们原始位置。最后, 分离样本函数的傅里叶频谱可合并为

$$\tilde{G}(k) = \frac{\sum_{m=1}^4 \tilde{G}_m(k)}{\sum_{m=1}^4 D(k - k_m) + \alpha}, \quad (8)$$

式中: α 是正则化常数, 保证数值计算稳定性。

对环形照明成像法的模拟重构结果与其他现有技术进行比较, 如图 15 所示。对比的其他技术包括傅里叶叠层成像法 (FPM)、基于 4 幅图像的傅里叶叠层成像法、20 \times 物镜的差分相衬成像法 (DPC)。所有傅里叶叠层成像法进行 20 次迭代。上述方法的重建性能取决于标称 0.5 NA 分辨率的有效成像, 但是它们之间存在本质区别。首先, 若保证环形照明成像法与傅里叶叠层成像法实现相同的空间带宽积 (FOV 10 \times , 0.5 NA 分辨率), 环形照明成像法仅使用 4 幅低分辨率图像, 而傅里叶叠层成像法则需要 81 幅; 若环形照明成像法和傅里叶叠层成像法采用相同数据集, 傅里叶叠层成像法会由于相邻孔径频谱重叠率过低而无法重构 (相邻孔径光谱重叠至少为 31.81%)。

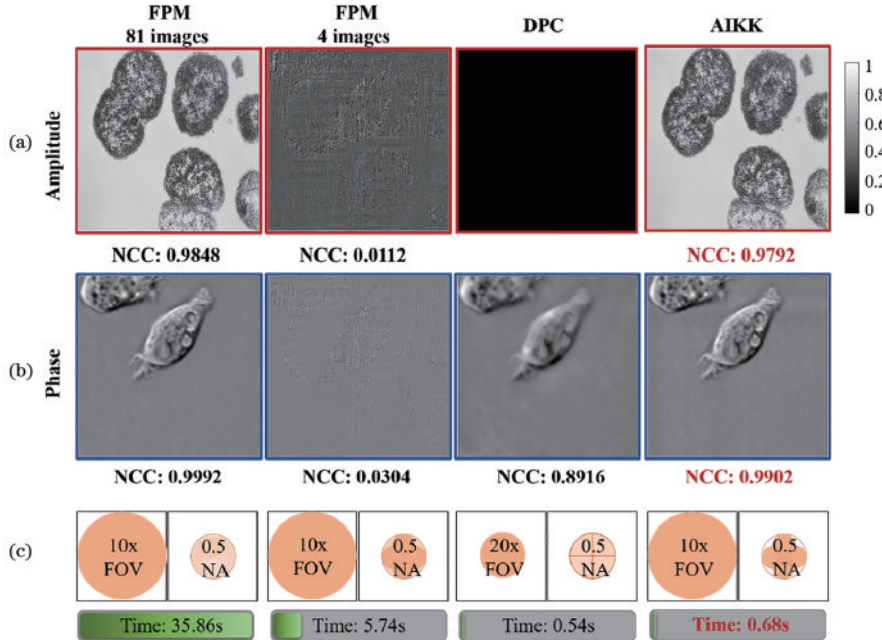


图 15 环形照明成像法、傅里叶叠层成像法和差分相衬成像法的重构结果对比^[68]。(a) 重构幅度; (b) 相位; (c) 分辨率、视场和重构时间
Fig. 15 Comparison of reconstruction results under several phase recovery algorithms^[68]. (a) Reconstructed amplitude; (b) phase; (c) resolution, FOV, and data processing time

与傅里叶叠层成像法相比, 环形照明成像法利用 Kramers-Kronig 关系进行重构时无须迭代, 重建时间从 35.86 s 压缩到 0.68 s, 数据采集量减少 95%, 计算时间减少 99%。与环形照明成像法的实验结构类似, 差分相衬

成像法也通过采集 4 幅强度图像 (左、右、上和下半圆形) 恢复定量相位图像。但与差分相衬成像法不同, 环形照明成像法既不需要满足弱目标近似假设, 重构过程也不需要反卷积进程。差分相衬成像法捕获原始强度图像中

应满足非相干衍射极限的奈奎斯特采样频率。为实现与环形照明成像法相同的分辨率,在差分相衬成像系统中使用更高放大倍数的物镜,然而,视场的损失远大于分辨率的提高,其代价是显著抑制成像系统空间带宽积。因此,环形照明成像法具有更好的灵活性,可根据样本观测需求,在视场、空间分辨率和时间分辨率之间进行权衡。

4.3 基于对角扩展采样的计算成像方法

环形照明的光学传递函数和探测器空间截止频率为 $\sqrt{f_x^2 + f_y^2} \leq k_{OTF} = 2NA_{obj}/\lambda$ 和 $|f_x| \& \lesssim |f_y| \leq k_{cam} =$

$M/(2\rho_s)$,其中 (f_x, f_y) 是二维频谱坐标, NA_{obj} 是物镜数值孔径, M 是显微镜放大倍数, ρ_s 是相机像素尺寸。为进一步提升环形照明成像法的分辨率,LED 使用波长更短的蓝光,如图 16 所示。环形照明成像系统的空间采样率为欠采样状态 ($R_{space} = k_{cam}/k_{OTF} = 0.7154 < 1$),此时应尽可能增大旋转角度。相对于水平方向和垂直方向,对角像素可以将成像分辨率扩展到 $\sqrt{2}$ 倍,采样频率的物理各向异性归因于正方形像素排列的性质。可通过旋转相机,保证入射光与探测器平面成 45° ,此时强度谱的小圆呈周期性排列分布,没有重叠^[69]。

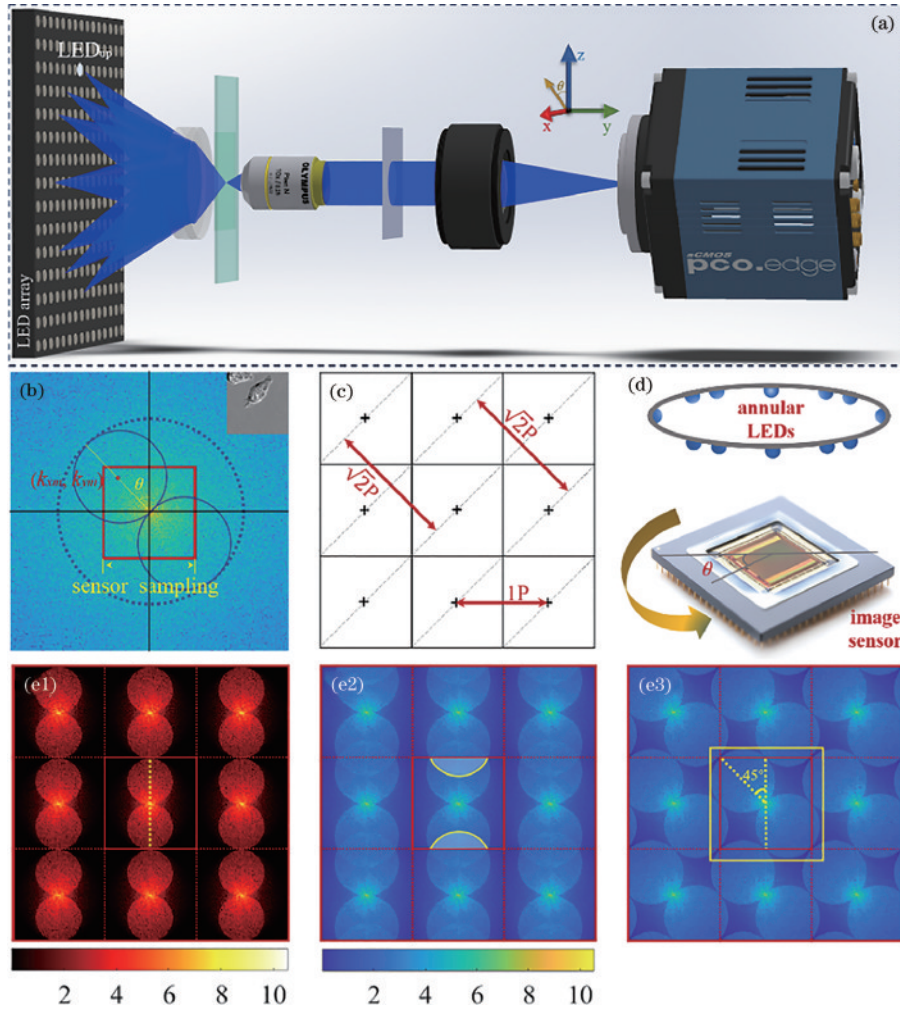


图 16 对角扩展采样法原理^[69]。(a)实验设置;(b)光学传递函数和相机空间截止频率;(c)图像传感器的像素排列;(d)频谱对角扩展方案;(e1)红光的强度谱分布;(e2)蓝光的强度谱分布;(e3)对角扩展采样法下的强度谱分布

Fig. 16 Principle of diagonal-expanded sampling method^[69]. (a) Experimental setup; (b) optical transfer function and spatial cutoff frequency; (c) pixel arrangement of the image sensor; (d) spectrum diagonal expansion scheme; (e1) intensity spectrum distribution under red LED; (e2) intensity spectrum distribution under blue LED; (e3) intensity spectrum replication distribution under diagonal-expanded sampling method

为证明对角扩展采样法的优化效果,对 1951 USAF 分辨率板进行成像,如图 17 所示。图 17(a1)和图 17(a2)是中心 LED 在 $10\times/0.25$ NA 物镜下捕获的低分辨图像的放大区域。当照明光源为红色 LED ($\lambda=625$ nm) 时,可分辨第 9 组第 4 线对,时域空间带宽积可以达到每秒 243.3 百万像素。当照明光源为蓝色

LED ($\lambda=465$ nm) 时,空间采样率不足,重叠区域干扰孔径和其他高频分量,只能分辨第 6 组和第 7 组,甚至无法实现低分辨图像的分辨率。1951 USAF 分辨率板的主要细节位于频谱的水平轴和垂直轴。因此,在对角扩展采样法实验中同时倾斜分辨率板以匹配入射角以获得更多细节信息。放大第 10 组第 1 线对,所选

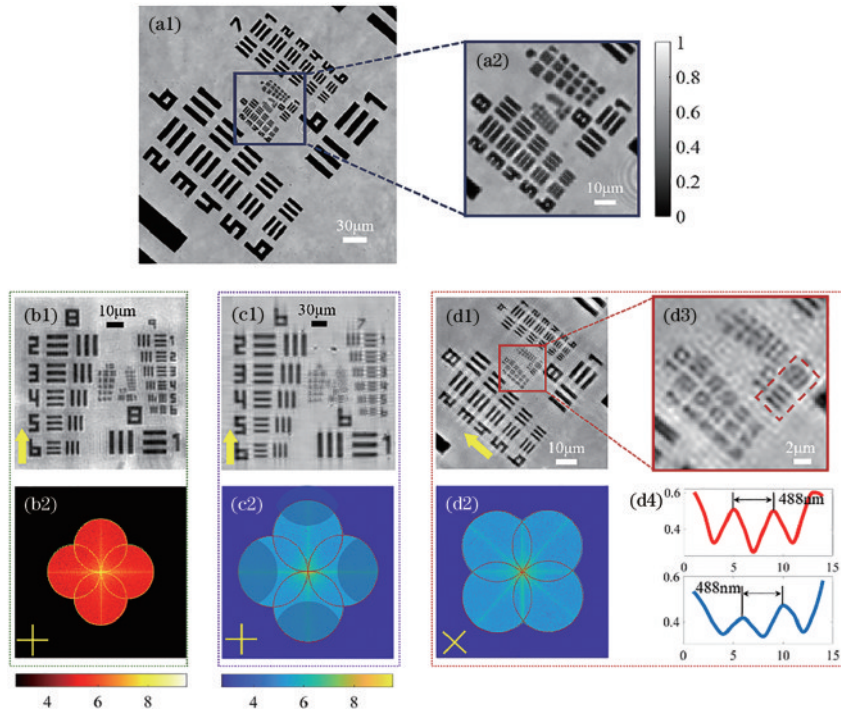


图 17 1951 USAF 分辨率板的实验重构结果^[69]。(a1)(a2)相机捕获图像放大;(b1)(b2)红光 LED 重构结果;(c1)(c2)蓝色 LED 重构结果;(d1)~(d4)对角线扩展频谱方案下的重构结果

Fig. 17 Experimental recovered results of the 1951 USAF target^[69]. (a1) (a2) Magnified raw captured images; (b1) (b2) results under red LEDs; (c1) (c2) results under blue LEDs; (d1)–(d4) results under the diagonal-expanded frequency-spectrum scheme

位置的线扫描轮廓可达 488 nm 最小分辨尺度,分辨率提升达 1.8 倍。

4.4 基于对称照明的单帧计算成像方法

图 18 为对称照明成像系统示意图^[70],在样本相位信息可忽略情况下,函数 $o(r)$ 等价于纯振幅样本。鉴于传感器的强度成像机制,当环上处于对称位置的 LED 被点亮时,成像系统捕获的低分辨图像具有相同的强度分布,即 $I_m^c(r) = I_{n/2+m}^c(r)$ 。根据时域频域对

偶对称性质,第 $(n/2 + m)$ 个 LED 频域波矢 $k_{n/2+m}^c$ 相当于 $-k_m^c$,捕获的原始低分辨图像强度谱可进行互相关,其计算式为

$$I_{n/2+m}^c(k) = \mathcal{F} \left\{ \left| o(r) e^{ik_c r} \otimes p_c(r) \right|^2 \right\} = [O(k + k_m^c) P_c(k)] \odot [O(k + k_m^c) P_c(k)]^*, \quad (9)$$

式中 c 表示不同颜色照明。

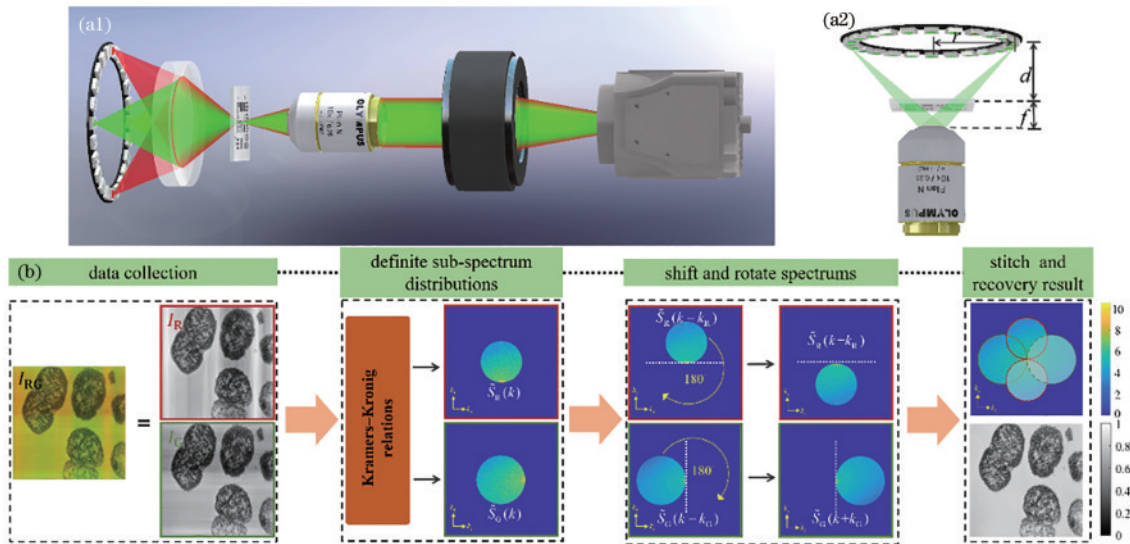


图 18 单帧计算成像方法原理^[70]。(a1)实验装置示意图;(a2)环形照明;(b)重构算法流程

Fig. 18 Schematic of single-frame computational imaging method^[70]. (a1) Schematic of experimental device; (a2) annular illumination; (b) flow chart of reconstruction algorithm

将对称照明思想引入孔径扫描系统,调幅掩模的边缘跨过频谱原点,并且不与其镜像形状重叠,以保证测量中的假设参考波满足 Kramers-Kronig 关系的临界情况,如图 19 所示。半矩形掩模的边缘需要精确地通过数值孔径原点。利用对称照明成像算法获得假定的子频谱分量后,使用旋转平移得到合成频谱与恢复的图像。对称照明思想可应用至孔径扫描系统,该系统外置频谱扫描设备和单色相机捕捉单帧图像,实现单

帧高分辨图像恢复,分辨率翻倍,同时数据采集量减少 3/4。恢复图像依赖于出射波,样本厚度不再影响重构效果。

基于空间域 Kramers-Kronig 关系的快速定量相位成像技术高度依赖频谱中心区域零序分量,系统分辨率在传统显微镜基础上只能提升 2 倍,可根据样本观测需求,在视场、空间分辨率和时间分辨率之间进行权衡。

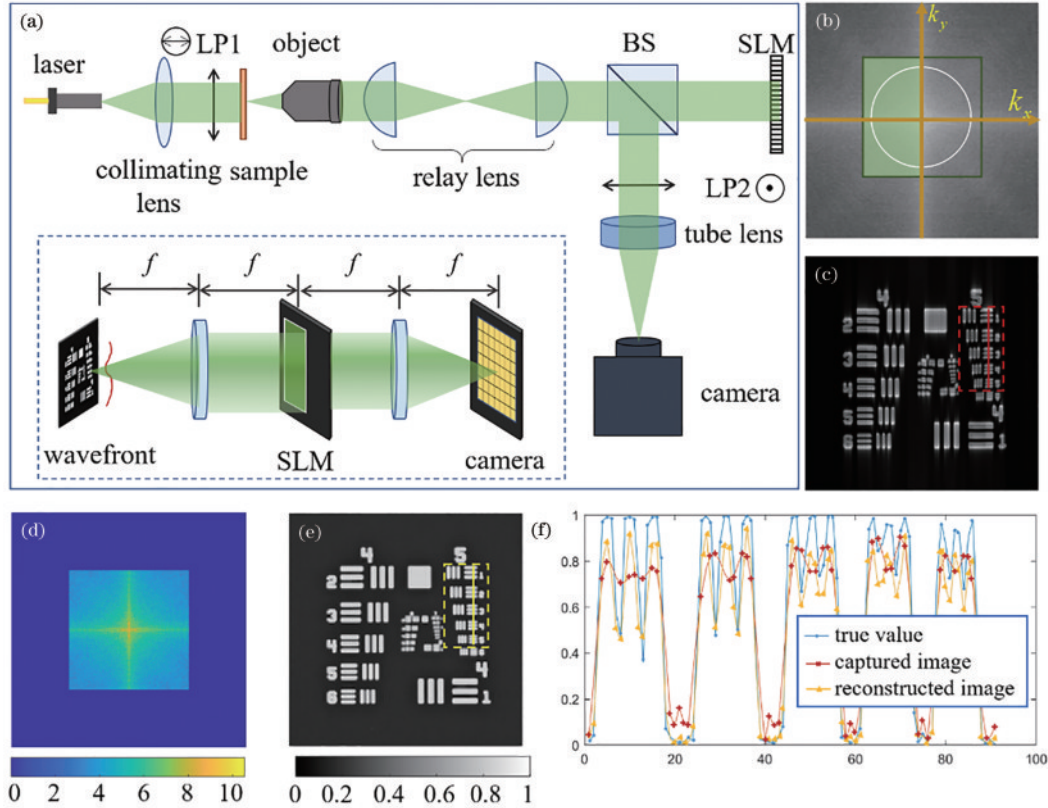


图 19 基于对称照明的孔径扫描成像^[70]。(a)原理图;(b)半矩形掩模;(c)捕获图像;(d)频谱拼接;(e)恢复图像;(f)线扫描轮廓
Fig. 19 Application of symmetric illumination to aperture scanning imaging^[70]. (a) Schematic of principle; (b) semi-rectangular mask; (c) captured image; (d) synthetic spectrum; (e) reconstructed image; (f) line scanning profile

5 快速自动聚焦技术

5.1 自动聚焦技术与关键算法

自动聚焦是依据清晰度评价函数,保证成像清晰而不可或缺的自动调节技术。无论是光学显微镜载物台移动过程中的聚焦,还是在计算成像技术中距离参数的确定,显微成像都与自动聚焦技术密不可分,为计算光学成像系统轴向距离参数的快速精确测算提供智能方案,保证高质量图像重建结果。自动聚焦技术根据实现方法可分为两类:主动式和被动式^[71]。随着人工智能技术的快速发展,深度学习和神经网络模型应用于自动聚焦技术中,通过学习大量的图像数据预测最佳聚焦位置。

主动式自动聚焦采用外置硬件测量实现,包括测距法、旋转光阑离焦检测法、视觉电子自动聚焦组件相

关法、动态聚焦透镜法(如电可调透镜^[72]和液体透镜^[73])等^[74-75]。测距法常使用红外或激光测算被聚焦物体与相机的距离,通过调整透镜位置实现聚焦,其成本和调节复杂度较高,但聚焦效率优势显著。

被动式自动聚焦通过数字图像处理技术分析离焦图像集,根据图像清晰度变化实现自动聚焦^[76]。被动聚焦技术包括对焦深度法和离焦深度法^[74]。对焦深度法的依据是:由光学系统形成的图像聚焦在特定距离,其他距离的物体散焦。该方法包括两阶段:确定描述不同位置聚焦程度的清晰度评价函数;根据清晰度评价函数搜索最佳聚焦位置。离焦深度法需要采集少量离焦图像,通过分析图像确定离焦信息,须预先建立光学系统离焦模型,提取离焦深度。离焦深度法的优点在于不依赖样本的特定属性、聚焦速度快且计算量小。然而,离焦深度法因模型误差而聚焦精度相对较低。

被动聚焦因成本低、功耗小、算法灵活易于控制等优点而得到广泛应用。被动自动聚焦对计算显微技术而言更可靠,适用于紧凑的光学系统且不依赖镜头使用和机械运动部件。

深度学习在自动聚焦技术中有巨大应用潜力,通过训练大规模数据集学习不同场景下的聚焦策略实现高精度的自动聚焦。高效的深度神经网络模型实现实时自动聚焦的方式适用于需要快速响应的应用场景。通过设计不同的深度神经网络模型适应不同的任务,以此兼容不同成像硬件并实现自动聚焦。深度学习技术仍须克服来自训练和普适性方面的诸多困难和挑战:技术对于大量训练数据的依赖,训练数据集质量不好或者样本量不足会导致模型过拟合或欠拟合,影响自动聚焦性能;需要大量计算资源和存储空间,包括高性能 GPU 和存储器,这些设备成本较高,会限制深度学习在自动聚焦技术中的应用;“黑箱”模型很难解释决策原因,难以理解模型在自动聚焦中的工作原理和性能瓶颈;通过某种或者某类数据集训练出来的神经网络在实际应用中仅对某类样本图像有效,普适性较差。

自动聚焦技术涉及图像预处理、清晰度评价和智

能搜索算法等多方面技术。图像预处理是自动聚焦技术中的关键环节,对后续图像分析与评估意义重大^[77-79]。离焦图像全局评价计算量大且耗时,易受背景信息干扰。图像预处理算法能够有效去除或减弱背景噪声干扰。自动聚焦过程中需要采用高效的图像预处理算法,在保证聚焦效果的同时提高处理速度和效率。智能搜索算法常用于优化问题,以实现解空间中的快速寻优。自动聚焦是距离寻优。搜索算法可加速寻找最佳聚焦位置,优化清晰度评价函数在均匀搜索中的计算时间和空间复杂度。常见搜索算法有二分搜索^[80]、分治搜索^[81]、爬山算法^[82]、斐波那契搜索算法^[83]。清晰度评价函数也称为锐度评价函数,是自动聚焦技术的核心算法,是评价离焦图像品质因数的重要函数^[84]。清晰度评价函数应具有无偏性、单峰性、抗噪性、灵敏度高和算法复杂性低等特点^[85]。清晰度评价函数可分为空域法、统计法和变换域方法 3 类^[86]。可根据具体的应用场景和需求选择这些方法。通常,综合考虑多个评价函数的结果可得到更准确的图像清晰度评估^[87]。根据图像处理任务不同,选择不同评价函数进行图像清晰度的评估和优化^[65]。表 1 给出文献中常用的清晰度评价函数。

表 1 常用清晰度评价函数汇总

Table 1 Summary of common clarity evaluation functions

Method category	Name and abbreviation	Expression
Spatial domain class	Summed gradient (GRA) ^[88-89]	$GRA(z) = \iint \nabla I(z) dzdy$
	Squared gradient (SG) ^[90]	$SG(z) = \iint \{ \nabla I(z) \}^2 dzdy$
	Integrated amplitude (AMP) ^[91]	$AM(z) = \frac{1}{MN} \sum I(x, y, z) $
	High-pass-filtered amplitude (HPA) ^[92]	$HPA(z) = \int dr (h \otimes g_a)(r) $
	Axial magnitude difference (DIF) ^[93]	$DIF(z) = \sum_x \sum_y \Delta U^2(x, y; l)$
	Tenengrad gradient (TNG) ^[94]	$TNG(z) = \iint \sqrt{[s_x \otimes I(z)]^2 + [s_y \otimes I(z)]^2} dzdy$
	Brenner gradient (Brenner) ^[95]	$Brenner(z) = \sum_x \sum_y [I(x+2, y, z) - I(x, y, z)]^2$
Statistical class	Logarithmically weighted and bandpass filtered power spectrum summation (SPEC) ^[88-89]	$SPEC(z) = \iint \ln \{1 + \mathcal{F}[I(z) - \bar{I}(z)] \} dzdy$
	Summed Laplacian (LAP) ^[88-89]	$LAP(z) = \iint [\nabla^2 I(z)]^2 dzdy$
	Entropy (SEN) ^[96-98]	$Entropy(z) = -\sum_{n=0}^{N-1} p_n \ln p_n$
	Variance (VAR) ^[88-89]	$VAR(z) = \sum_{x,y} I(z) - \bar{I}(z) ^2$
	Tamura coefficient (TC) ^[99]	$TC(z) = \sqrt{\text{std}(\nabla \sqrt{I(z)}) / \text{mean}(\nabla \sqrt{I(z)})}$
	Gini index (GI) ^[100]	$GI(z) = 1 - 2 \sum_{k=1}^N \frac{a_{[k]}}{\text{sum } C_z} \times \frac{N-k+0.5}{N}$
	Tamura coefficient of gradient (ToG) ^[101]	See TC
Gini coefficient of gradient (GoG) ^[101]	See GI	

自动聚焦技术现存主要问题如下:彩色显微成像聚焦结果误差大、灵敏度低;单一清晰度函数无法全面表

征图像清晰信息;离焦图像数据集感兴趣区域难以得到快速且精准提取;通用加速搜索算法处于亟需状态。

对于彩色显微图像的自动聚焦,多数方法是使用清晰度评价函数评估其灰度转换后的图像的。彩色显微图像的成像过程受到多种因素的影响,如光照、样品折射率和厚度等都会影响自动聚焦算法的准确性和稳定性^[102]。彩色显微成像的自动聚焦技术主要难点在于彩色显微图像具有多通道、复杂的颜色变化和纹理信息。单通道灰度图像的预处理方式难以应对彩色图像的复杂情况。

5.2 基于 Tanimoto 系数和多相梯度绝对值的快速自动聚焦方法

图 20(a)为共焦显微系统的焦点堆栈采集机制。该机制等间隔记录前焦面、焦平面和后焦面的一组离焦图像集合,提取每张图像的品质因数用于评估聚焦质量。该方法称为焦点图测量法^[80]。根据聚焦特性,聚焦图像比离焦图像包含更多的规则特征。如图 20(b)

所示,由于像素与波长间的关联性^[103],距离焦平面越远,两个不同彩色通道之间的像素差异越大。图 20(c)给出基于 Tanimoto 系数^[104-106]的像素差异(PDTC)清晰度评价方法^[107]。将彩色离焦图像数据集中的两个颜色通道像素值集合表示为 I_{λ_1} 和 I_{λ_2} :

$$\begin{cases} \text{NBTh}(I_{\lambda_1}) = P_{\lambda_1}(x_i) = \{x_i, i = 1, \dots, m\} \\ \text{NBTh}(I_{\lambda_2}) = P_{\lambda_2}(x_j) = \{x_j, j = 1, \dots, n\} \end{cases}, \quad (10)$$

式中:NBTh表示对图像进行归一化、二值化和阈值处理,对应图 20(c)中的 N、B 和 Th; x_i 和 x_j 表示像素集合 P_{λ_1} 和 P_{λ_2} 中经 NBTh 处理后的剩余像素,记 $C_1 = P_{\lambda_1}(x_i)$ 和 $C_2 = P_{\lambda_2}(x_j)$ 。单幅彩色图像中两个单色通道图像的像素相似度用 Tanimoto 系数表示为

$$\text{TC}(C_1, C_2) = \frac{C_1 C_2}{\|C_1\|_2^2 + \|C_2\|_2^2 - C_1 C_2}, \quad (11)$$

式中: $\|\cdot\|_2$ 表示 L-2 范数。

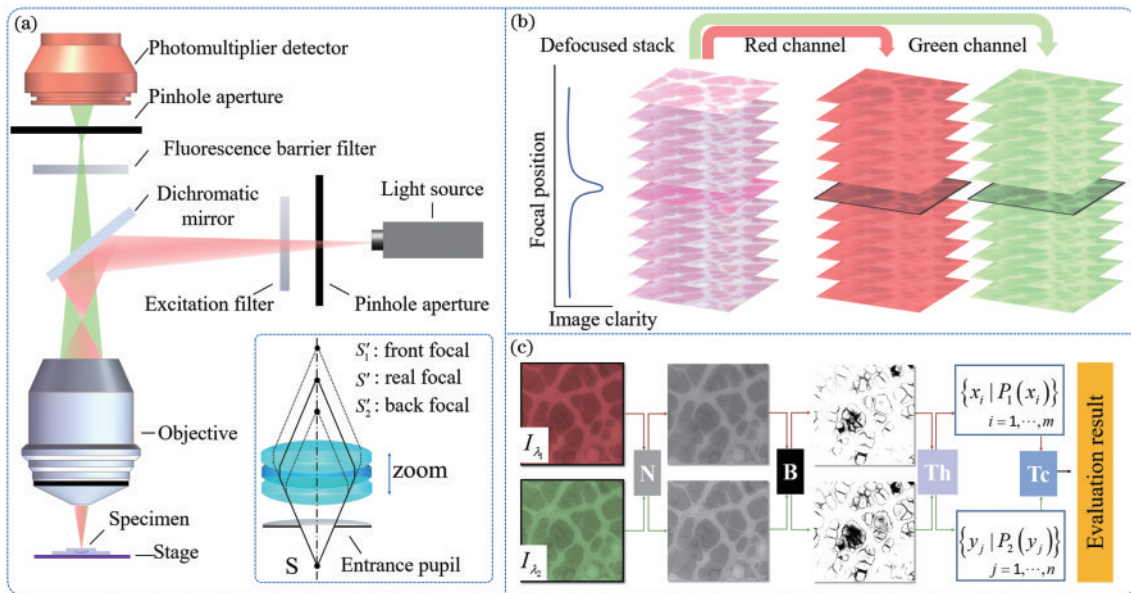


图 20 基于 Tanimoto 系数的快速自动聚焦方法流程^[107]。(a)共焦显微系统的焦点堆栈采集机制;(b)提取两个单色通道图像集合;(c)图像处理与像素差异计算

Fig. 20 Fast autofocusing method flow based on Tanimoto coefficient^[107]. (a) Acquisition mechanism of the focal stack of the confocal microscopic system; (b) extraction of two monochrome channel image sets; (c) image processing and pixel difference calculation

为验证聚焦方法在纹理信息复杂的生物样本中的有效性,采集图 21(a)所示人类甲状腺病理切片的离焦图像数据集。图 21(b)和图 21(c)分别对应样本在 HSI 和 YcbCr 颜色空间的转换结果。图 21(d)和图 21(e)分别为图 21(b)和图 21(c)所对应的灰度离焦数据自动聚焦曲线。在图 21(d)中,SEN 和 AMP 表现出明显振荡,TC 和 HPA 错误识别聚焦位置。在图 21(e)中,SEN 和 AMP 虽然正确聚焦,但振荡明显,而 HPA 聚焦失败。自动聚焦曲线峰值两侧呈狭窄分布且具有迅速下降的衰减趋势。

单波长光照明下,成像的波长依赖性转换为对距离的依赖性,产生不同离焦位置上的图像差异。图 22

为在单波长离焦图像数据集中的应用以及新方法与轴向幅度差分算法(详见表 1)的对比结果。当轴向幅度差分算法用于干净背景的分辨率板时,自动聚焦曲线的最大值与准焦位置一致;用于其他样本时,自动结果全部错误且曲线波动剧烈。新方法成功选出聚焦图像,依旧呈现高灵敏度和精确聚焦的优点。通过自动聚焦曲线的线形、峰度值、离焦区域波动情况和算法耗时等方面的综合分析可体现新方法的优越性^[107]。

图像梯度算子是用于计算图像中像素变化的工具,通常用于边缘检测和特征提取等图像处理问题。图像的一阶导数和二阶导数可描述边缘和纹理特征^[108],其他特点如表 2 所示。

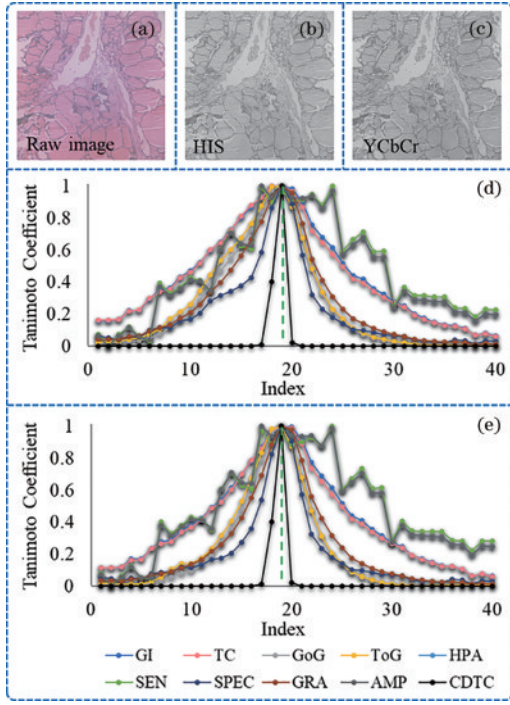


图 21 人类甲状腺病理切片的自动聚焦结果^[107]。(a)原始图像；(b)(c)转换到 HSI 和 YCbCr 空间的灰度图像；(d)(e)图 21(b)和图 21(c)所在的灰度离焦数据集的自动聚焦曲线

Fig. 21 Autofocusing results of human thyroid pathology section^[107]. (a) Raw image; (b)(c) gray scale images converted to HSI and YCbCr spaces, respectively; (d)(e) corresponding the autofocusing curves of the grayscale defocus dataset in Fig. 21(b) and Fig. 21(c), respectively

根据一阶微分和二阶微分的特点,使用一阶和二阶微分算子分别在图像的±45°方向和x、y方向上计算梯度。4个方向的组合可突出图像的边缘信息和详细的纹理信息。

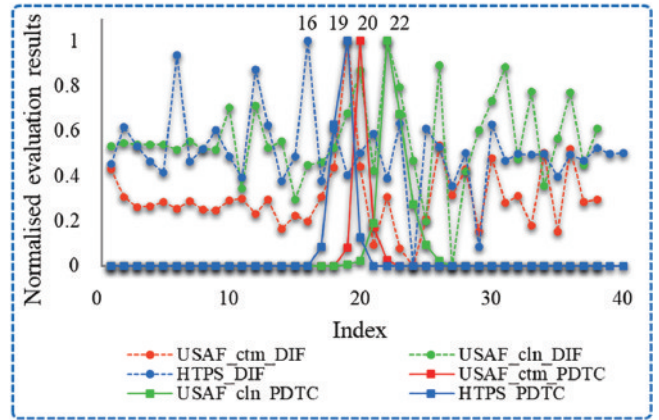
表 2 一阶、二阶梯度算子比较

Table 2 Comparison of first-order and second-order gradient operators

Description	The first-order operator	The second-order operator
Classical operation	Sobel, Prewitt, and Roberts	Laplacian, LoG, and DoG
Calculation result	Gradient amplitude and direction	Gradient amplitude and direction
Result meaning	Fastest pixel change	Fastest gradient change
Method	The first order difference	The second order difference
Sensitivity	Sensitive to noise	Insensitive to noise
Computational complexity	Low	Higher
Scope of application	Edge detection; feature extraction	Corner detection; texture analysis

图 23(b)给出多幅衍射强度图像的自动聚焦曲线的理想线形。将图像多方向上的一阶导数和二阶导数结合作为清晰度评价函数聚焦曲线,可获得更陡峭的峰状分布。

图 24 为跳蚤图案的多向梯度分布图。图 24(a)~(d)分别为±45°方向上的一阶导数和x、y方向上的二



USAF_ctm, the contaminated USAF; USAF_cln, the clean USAF

图 22 与轴向幅度差分算法在单波长离焦堆栈中的自动聚焦性能比较^[107]

Fig. 22 Comparison of autofocusing performance of PDTC and DIF in a single wavelength defocus stack^[107]

图 23 给出 4 个方向绝对值最大梯度的清晰度评价方法,其数学表达式为

$$F_{PMG} = \max(|G_{x+}|, |G_{y+}|, |G_{+45}|, |G_{-45}|) + c, \quad (12)$$

式中:|G_{x+}|、|G_{y+}|、|G₊₄₅|和|G₋₄₅|表示x方向、y方向和±45°方向梯度;为避免结果为0,c为正值常数。式(12)中的G_{x+}、G_{y+}、G₊₄₅和G₋₄₅对应图23(a)中的蓝色实线、红色实线、蓝色虚线和红色虚线。以M和N表示图像沿x和y方向的像素数量,表达式为

$$\begin{cases} G_{x+} = \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=1}^{N-2} |f(x+2, y) - f(x, y)| \\ G_{y+} = \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=1}^{N-2} |f(x, y+2) - f(x, y)| \\ G_{+45} = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} |f(x, y) - f(x+1, y+1)| \\ G_{-45} = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} |f(x+1, y) - f(x, y+1)| \end{cases} \quad (13)$$

阶导数的梯度分布。不同方向的梯度计算仅表征该方向的像素差分情况。图 24(a)~(d)中黄色矩形框内的梯度分布各不相同。图 24(e)为合成不同方向上梯度最大值后的分布情况,其中矩形框选区域的梯度分布较图 24(a)~(d)更显著。多向梯度可更为全面地表示图像特征。

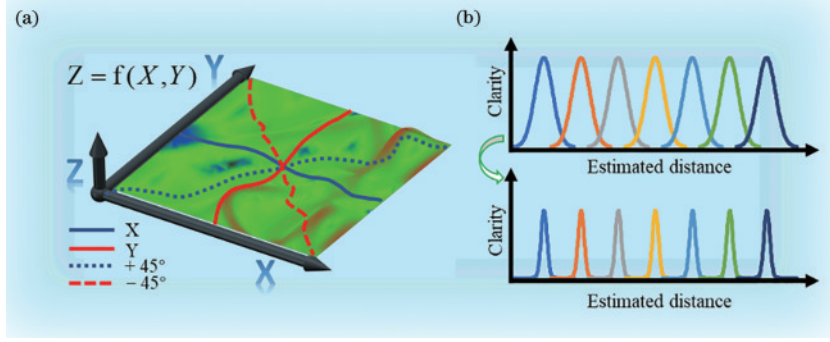


图 23 基于多向最大梯度的清晰度评价函数^[109]。(a)多向最大梯度法;(b)自动聚焦曲线

Fig. 23 Clarity evaluation function of polydirectional maximum gradient^[109]. (a) Polydirectional maximum gradient method; (b) autofocusing curves

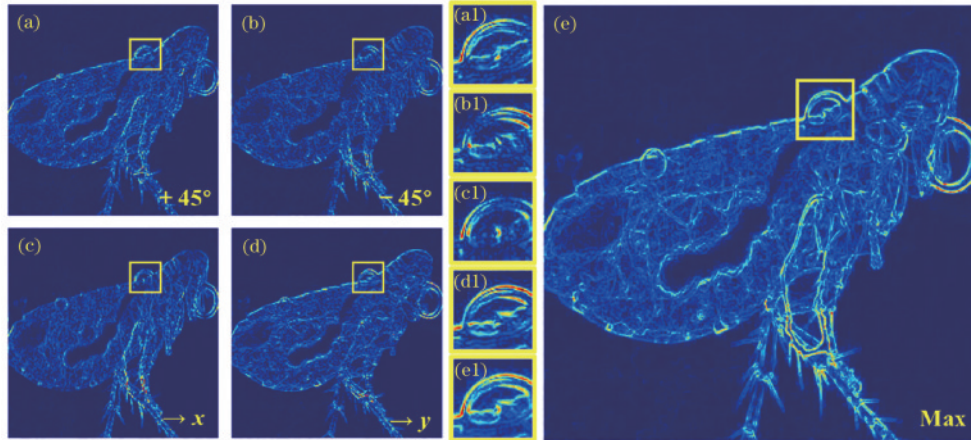


图 24 跳蚤图案的多向梯度分布^[110]。(a)~(d) $\pm 45^\circ$ 以及 x, y 方向的梯度分布;(e)合成最大梯度分布

Fig. 24 Flea pattern's polydirectional gradient distribution^[110]. (a)~(d) Gradient distribution along $\pm 45^\circ$, x , and y directions; (e) synthetic maximum gradient distribution

5.3 基于特征区域提取和细分搜索的快速自动聚焦方法

自动聚焦过程^[109, 111-118]需要采用高效的图像预处理算法,能够在保证聚焦效果的同时,提高速度和效率。从采样角度考虑,设计针对各类图案复杂样本的通用性感兴趣区域提取算法以减少清晰度评价函数的计算量^[109]。Harris角点检测算子的核心是图像灰度在窗口内的自相关运算。通过窗口的微小移动实现角点检测^[117-118]。以图像像素为中心,像素向水平和垂直方向移动。灰度变化自相关函数近似展开的泰勒公式为

$$M = \sum_{x,y} \omega(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中: $\omega(x,y)$ 为权重系数,通常以高斯加权函数表示; I_x 和 I_y 分别表示图像在水平方向和垂直方向的偏导数。自相关矩阵的特征值表示像素变化幅度。利用角点响应函数计算每个角点的响应值 R ,然后用 R 判断是否为角点。角点响应函数表示为

$$R = \det(M) - k[\text{tr}(M)]^2 = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2, \quad (15)$$

式中: $\det(\cdot)$ 和 $\text{tr}(\cdot)$ 分别表示求矩阵的行列式和迹; k 是经验常数,通常取值范围从0.04到0.06; λ_1 和 λ_2 是

矩阵 M 的两个特征值。根据计算得到的Harris响应函数的值,选取合适阈值,将响应值大于阈值的像素点标记为角点。为避免重复检测角点,对检测到的角点进行非极大值抑制。如果 $R > 0$,判定该像素是图像角点。

图 25 为显著特征区域选择的计算流程。角点检测算法采用衍射强度图像作为研究对象。角点密度最大区域被选择为显著性特征区域。该区域的左上角坐标

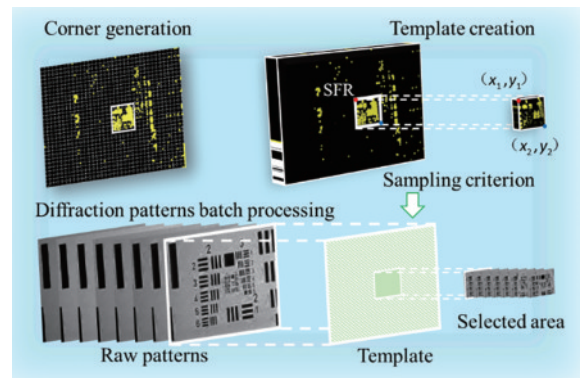


图 25 显著特征区域选择方案^[109]

Fig. 25 Salient feature region selection scheme^[109]

和右下角坐标分别表示为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 。 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 确定的矩形区域作为所有采集的衍射强度图像采样模板。经特征区域采样后,清晰度评价用时显著减少。不同清晰度评价方法绘制的自动聚焦曲线焦点附近更尖锐、非聚焦区域更平坦,曲线峰度值显著提升。说明经特征区域采样后,自动聚焦曲线得以优化,算法耗时明显降低^[109]。

智能搜索算法为自动聚焦技术提供更加精准和高效的结果,可提高显微成像系统的成像质量和效率。在多距离相干衍射成像中,多衍射面定位的高计算成本主要源于均匀搜索(遍历搜索)策略。精确定位可保障重建图像质量,但会引起大量计算用时。基于细分

搜索的快速自动聚焦方法可快速、准确地获取衍射距离。

遍历搜索(均匀搜索)算法搜索问题空间中的每个可能解,寻找一个满足特定要求的结果。在图 26 所示的多距离相干衍射成像系统的自动聚焦技术中,遍历搜索算法用于搜索各记录的衍射平面位置,以找到最佳衍射距离。该算法会在预设值搜索范围和间隔下重构离焦图像数据集并计算图像的清晰度,再通过比较这些清晰度值,以找到最佳的衍射距离。对于图 27 所示的自动聚焦遍历搜索方案,需要计算和评估多个轴向位置上的衍射强度图像。图像数量越多,遍历搜索越细致。然而,高质量的成像结果需要自动聚焦过程的较大计算量。

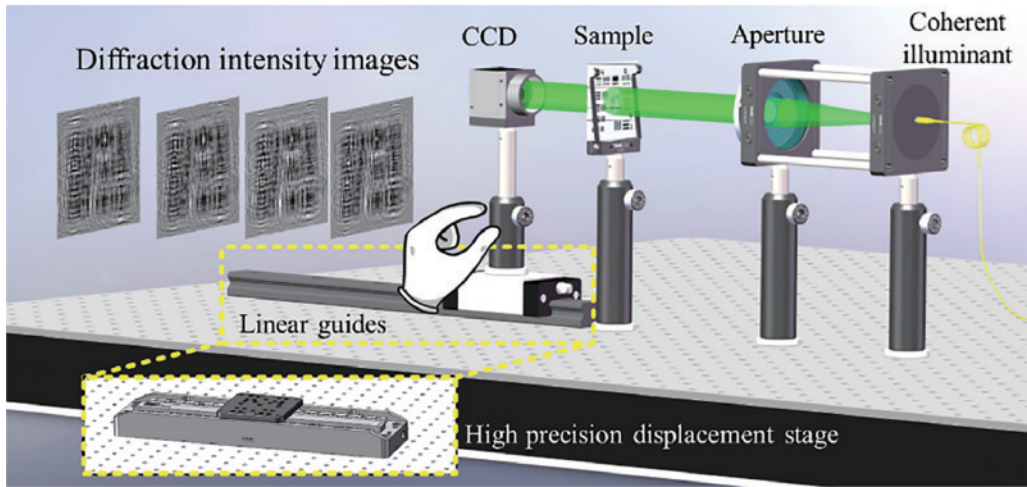


图 26 多距离相干衍射成像系统^[63]

Fig. 26 Multi-distance coherent diffraction imaging system^[63]

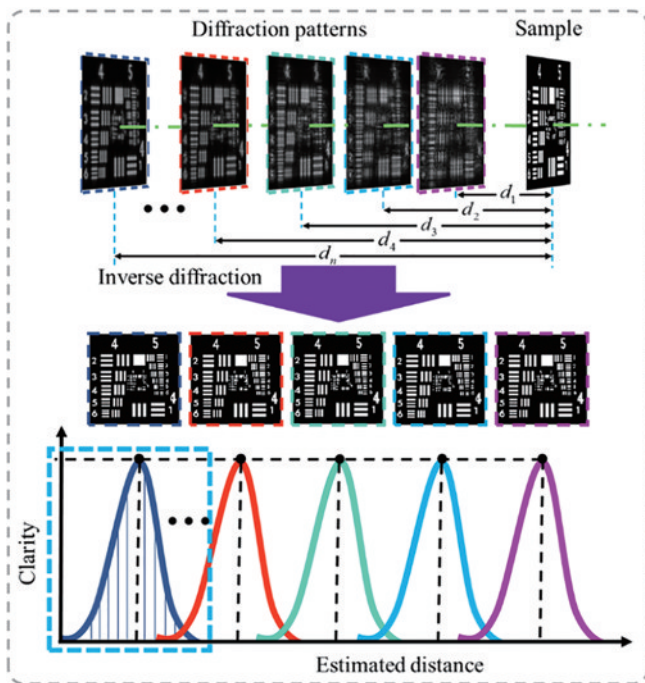


图 27 遍历搜索方案^[63]

Fig. 27 Scheme of traversal search^[63]

在图 28(a)中,自适应细分搜索方法可减少计算量,提高精度。为各衍射强度图像设置搜索距离边界值 d_1 和 d_2 ,保证实际衍射距离包含在设定搜索范围内;两者平均值 d_3 作为初始估计距离;距离 d_4 取值为 $d_3 + (d_2 - d_1)/n$,作为计算清晰度评价结果差值的参考;分别计算 d_3 和 d_4 位置的逆衍射图像清晰度;比较清晰度值 f_3 和 f_4 ,更新搜索边界。重复上述步骤,最终衍射距离收敛到最佳值 $d_{best, n}$ 。图 28(b)为细分搜索的计算流程。

在图 29 中,使用归一化后的 TC 和 SG 两种清晰度评价函数。设定搜索精度为 0.1 mm、0.01 mm、0.001 mm 和 0.0001 mm。6 个细分倍数取值分别为 2、5、10、20、50 和 100。迭代总次数分别是 328 次(对应搜索精度为 0.01 mm)、32800 次(对应搜索精度为 0.0001 mm)和 128 次(对应细分倍数为 100)。在相同搜索范围和精度下,遍历搜索用时约为细分搜索的 30 倍。

图 30 为使用高精度位移台距离和细分搜索的自动聚焦的重构样本图像。图 30(a)和图 30(d)对应的大空间结构重构质量相当。图 30(b)(c)和图 30(e)(f)

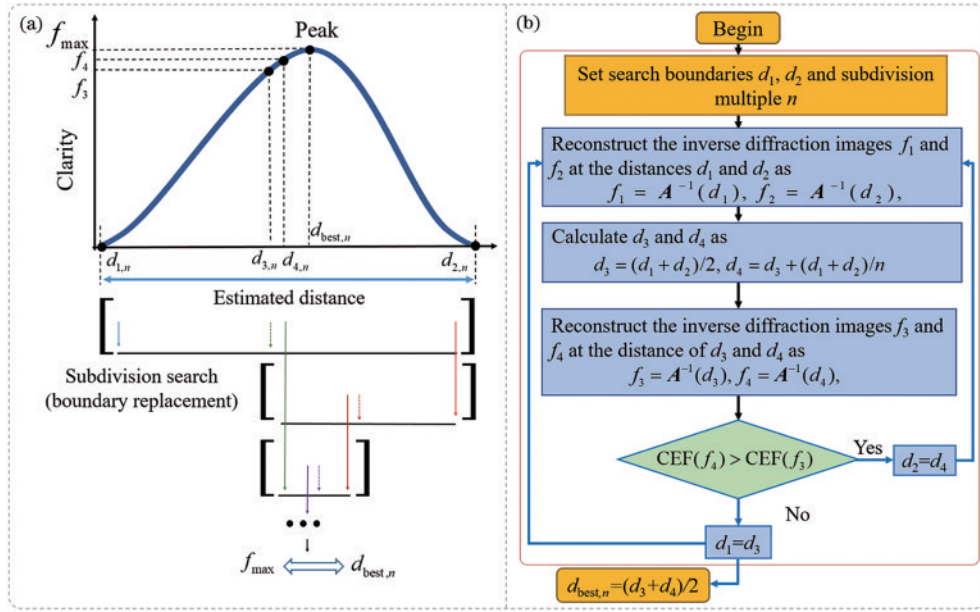


图 28 细分搜索^[63]。(a)模型;(b)流程图

Fig. 28 Segmented search^[63]. (a) Model; (b) block flowchart diagram

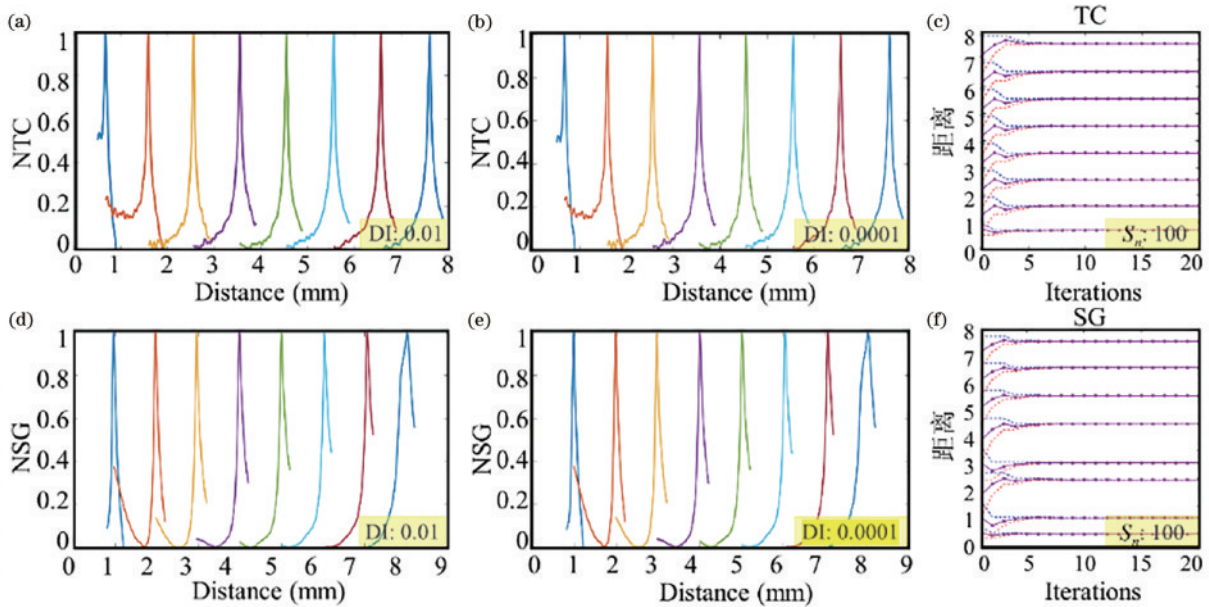


图 29 自动聚焦曲线^[63]。(a)~(c)分辨率板不同搜索精度的遍历搜索自动聚焦曲线和细分搜索曲线;(d)~(f)生物样本不同搜索精度的遍历搜索自动聚焦曲线和细分搜索曲线

Fig. 29 Autofocusing curves^[63]. (a)~(c) Autofocusing curves of traverse search with different search accuracy and subdivision searching curves for USAF target; (d)~(f) autofocusing curves of traverse search with different search accuracy and subdivision searching curves for biological sample

分别对应图 30(a)和图 30(b)的局部放大。错误的自动聚焦结果使图 30(c)中分辨率板的第 6 和第 7 组所有元素淹没在背景噪声中。使用新方法计算的距离重构的图像具有更高的对比度,如图 30(f)所示。图 30(c)和图 30(f)中绘制的线条对应局部图案切线处像素值分布曲线,从重构结果可识别第 7 组第 6 线。

纤维性甲状腺病理切片的重构结果如图 31 所示。图 31(a)(b)和图 31(c)(d)分别对应高精度位移台距离和细分搜索的自动聚焦的重构样本图像。根据

图 31(a)(c)的重构振幅,细分搜索算法获得的衍射距离所对应的重构图像具有更好的对比度。图 31(b)(d)的相位信息表明:使用细分搜索算法所得距离的重构相位图的动态分布范围更大。图 31(a1)~(a3)和图 31(b1)~(b3)分别对应图 31(a)和图 31(b)中 R1~R6 六个区域。成像结果放大后,样本细节信息更清晰、边缘更锐利且背景更干净。结果表明:使用细分搜索算法与清晰度评价函数相结合计算的衍射距离更准确,重构图像具有更高的分辨率。

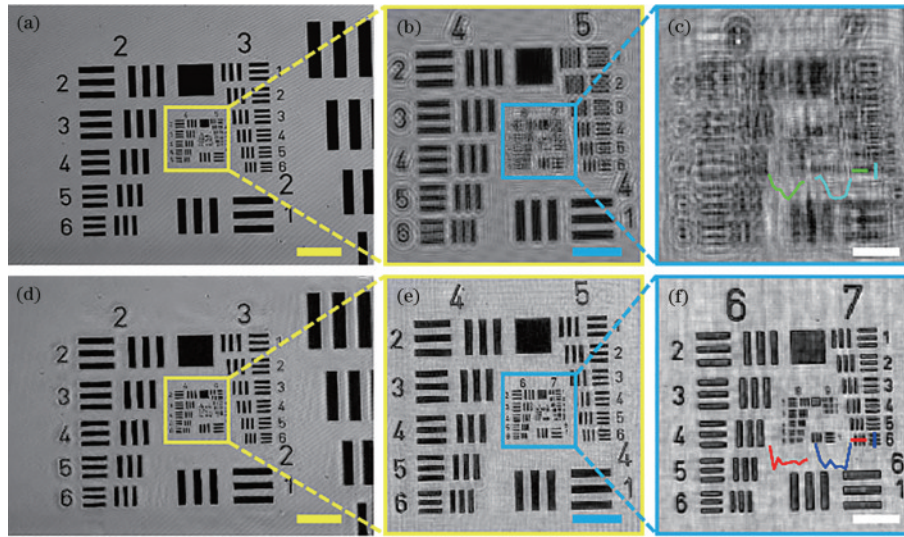


图 30 基于不同自动聚焦方案的重构的分辨率板,黄色、蓝色和白色的比例尺分别为 $800\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ ^[63]。(a)(d)大空间结构重构结果;(b)~(f)局部放大

Fig. 30 USAF target reconstruction results under different distance acquisition schemes, the yellow, blue, and white bars are corresponding to $800\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{m}$, and $50\ \mu\text{m}$, respectively^[63]. (a)(d) Reconstruction results of large space structures; (b)~(f) localized enlargement

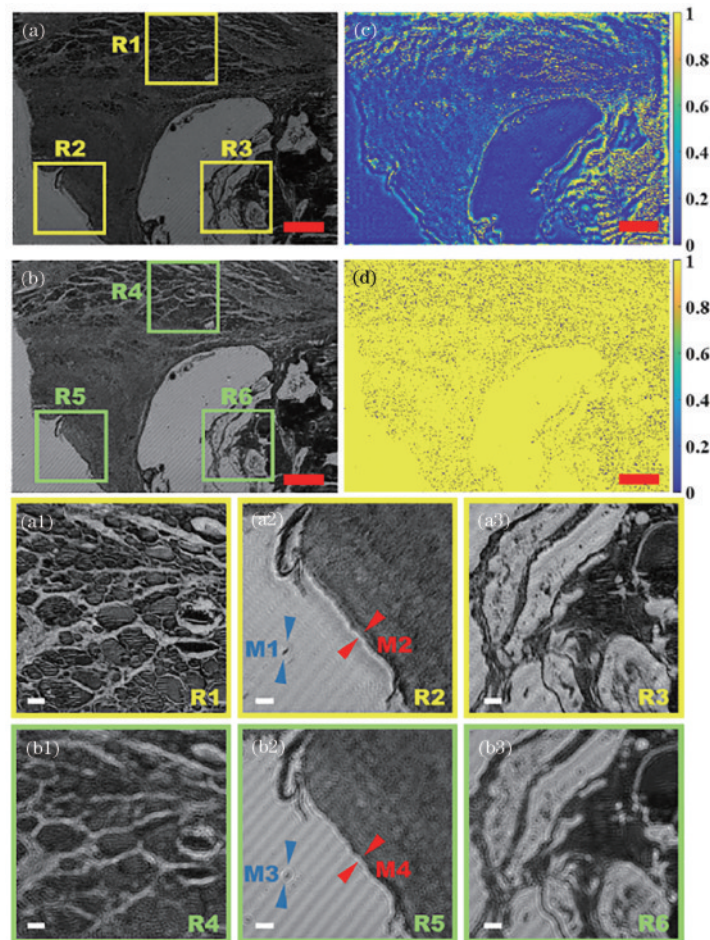


图 31 不同自动聚焦方案所得生物样本的重构结果。(a)(b)重构的振幅;(c)(d)重构的相位;(a1)~(a3)对应图 31(a)中 R1~R3 三个区域的放大;(b1)~(b3)对应图 31(b)中 R4~R6 三个区域的放大

Fig. 31 Biological sample reconstruction results under different autofocusing schemes. (a)(b) Reconstructed amplitude; (c)(d) reconstructed phase; (a1)~(a3) corresponding amplification of the three regions R1~R3 in Fig. 31(a); (b1)~(b3) corresponding amplification of the three regions R4~R6 in Fig. 31(b)

6 结 论

计算光学成像技术突破和弥补了多种限制,比如分辨率、视场、应用场景等。为提高成像性能,研究人员设计了一系列扫描方案,然而扫描操作测算耗时,机械扫描还存在影响设备寿命等缺陷。因此,有必要从系统和算法角度对成像系统进行提速研究。本文综述内容为计算成像系统提速提供可行的测算加速方案。通过降维测量、并行计算、非线性权重反馈等方式加速测算过程。针对傅里叶叠层成像技术,基于 Kramers-Kronig 关系的快速定量相位成像方法可实现非迭代测算模式,显著加速定量相位成像技术。自动聚焦技术可为多参数计算成像系统提供高精度距离参数获取方案,本文介绍的聚焦方法比传统聚焦方案具有快速测算的优势。

单次曝光或记录方案有望为计算光学成像系统带来新的技术革新思路。快速高性能光学成像系统将是成像设备的美好愿景。高光谱信息的采集将为计算光学成像系统植入更多的信息维度,拓宽其应用范围。为提高成像性能,计算光学成像方法有时会考虑进行冗余测量而导致测算相对耗时,限制了在快速成像和瞬态现象观测的应用。在本文介绍方法的基础上开展高时空带宽积显微成像技术具有重要应用价值,开展动态成像、三维成像等更为实用的计算光学成像技术研究。计算光学成像技术方兴未艾,是一个多学科融合的研究领域,当前人工智能方法的突飞猛进也会助力计算光学成像技术发展。

参 考 文 献

- [1] Kong X Y, Xiao K, Wang K W, et al. Phase microscopy using band-limited image and its Fourier transform constraints[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(12): 3251-3254.
- [2] Zheng G, Horstmeyer R, Yang C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 739-745.
- [3] Song S, Kim J, Hur S, et al. Large-area, high-resolution birefringence imaging with polarization-sensitive Fourier ptychographic microscopy[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(1): 158-165.
- [4] Lee K C, Lee K, Jung J, et al. A smartphone-based Fourier ptychographic microscope using the display screen for illumination[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(5): 1307-1315.
- [5] Ma X, Yao M H, Zhang Z B, et al. Computational oblique illumination microscopy with isotropic high resolution[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2020, 6: 317-327.
- [6] Bianco V, Mandracchia B, Bèhal J, et al. Miscalibration-tolerant Fourier ptychography[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(4): 7500417.
- [7] Bian L H, Zheng G, Guo K K, et al. Motion-corrected Fourier ptychography[J]. *Biomedical Optics Express*, 2016, 7(11): 4543-4553.
- [8] Zheng C J, Zhang S H, Yang D L, et al. Robust full-pose-parameter estimation for the LED array in Fourier ptychographic microscopy[J]. *Biomedical Optics Express*, 2022, 13(8): 4468-4482.
- [9] Hu C F, Kandel M E, Lee Y J, et al. Synthetic aperture interference light (SAIL) microscopy for high-throughput label-free imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(23): 233701.
- [10] Dong J, Yetisen A K, Zhao C, et al. Single-shot high-throughput phase imaging with multibeam array interferometric microscopy[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(12): 3536-3547.
- [11] Ďuriš M, Bouchal P, Rovenská K, et al. Coherence-encoded synthetic aperture for super-resolution quantitative phase imaging[J]. *APL Photonics*, 2022, 7(4): 046105.
- [12] Yeh L H, Chowdhury S, Waller L. Computational structured illumination for high-content fluorescence and phase microscopy[J]. *Biomedical Optics Express*, 2019, 10(4): 1978-1998.
- [13] Li J J, Zhou N, Sun J S, et al. Transport of intensity diffraction tomography with non-interferometric synthetic aperture for three-dimensional label-free microscopy[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 154.
- [14] Ahar A, Chlipala M, Birnbaum T, et al. Suitability analysis of holographic vs light field and 2D displays for subjective quality assessment of Fourier holograms[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 37069-37091.
- [15] Shin J, Bosworth B T, Foster M A. Compressive fluorescence imaging using a multi-core fiber and spatially dependent scattering[J]. *Optics Letters*, 2016, 42(1): 109-112.
- [16] Frese D, Sain B, Zhou H Q, et al. A wavelength and polarization selective photon sieve for holographic applications[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(18): 4543-4550.
- [17] Lu L P, Li J J, Shu Y F, et al. Hybrid brightfield and darkfield transport of intensity approach for high-throughput quantitative phase microscopy[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(5): 056002.
- [18] Liu S Y, Mulligan J A, Adie S G. Volumetric optical coherence microscopy with a high space-bandwidth-time product enabled by hybrid adaptive optics[J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, 9(7): 3137-3152.
- [19] Ibrahim D G A. Fast phase-shifting technique for 3-D surface micro-topography measurement[J]. *Measurement*, 2019, 135: 106-111.
- [20] Bumstead J R, Park J J, Rosen I A, et al. Designing a large field-of-view two-photon microscope using optical invariant analysis[J]. *Neurophotonics*, 2018, 5(2): 025001.
- [21] Fan J T, Suo J L, Wu J M, et al. Video-rate imaging of biological dynamics at centimetre scale and micrometre resolution[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(11): 809-816.
- [22] Park J, Brady D J, Zheng G, et al. Review of bio-optical imaging systems with a high space-bandwidth product[J].

- Advanced Photonics, 2021, 3(4): 044001.
- [23] Wang Z, Lü G Q, Feng Q B, et al. Enhanced resolution of holographic stereograms by moving or diffusing a virtual pinhole array[J]. Optics Express, 2020, 28(15): 22755-22766.
- [24] Wang H D, Göröcs Z, Luo W, et al. Computational out-of-focus imaging increases the space-bandwidth product in lens-based coherent microscopy[J]. Optica, 2016, 3(12): 1422-1429.
- [25] Picazo-Bueno J A, Trusiak M, Micó V. Single-shot slightly off-axis digital holographic microscopy with add-on module based on beamsplitter cube[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5655-5669.
- [26] Shan M G, Kandel M E, Majeed H, et al. White-light diffraction phase microscopy at doubled space-bandwidth product[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 29033-29039.
- [27] Luo W, Zhang Y B, Feizi A, et al. Pixel super-resolution using wavelength scanning[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(4): e16060.
- [28] Yao M H, Cai Z X, Qiu X, et al. Full-color light-field microscopy via single-pixel imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6521-6536.
- [29] Wu X J, Sun J S, Zhang J L, et al. Wavelength-scanning lensfree on-chip microscopy for wide-field pixel-super-resolved quantitative phase imaging[J]. Optics Letters, 2021, 46(9): 2023-2026.
- [30] Zhou N, Li J J, Sun J, et al. Single-exposure 3D label-free microscopy based on color-multiplexed intensity diffraction tomography[J]. Optics Letters, 2022, 47(4): 969-972.
- [31] Geng M Y, Yang X L, Chen H, et al. Optically transparent graphene-based cognitive metasurface for adaptive frequency manipulation[J]. Photonics Research, 2022, 11(1): 129-136.
- [32] 左超, 陈钱. 计算光学成像: 何来, 何处, 何去, 何从?[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(2): 20220110.
Zuo C, Chen Q. Computational optical imaging: an overview[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(2): 20220110.
- [33] Zhao W S, Zhao S Q, Li L J, et al. Sparse deconvolution improves the resolution of live-cell super-resolution fluorescence microscopy[J]. Nature Biotechnology, 2022, 40(4): 606-617.
- [34] Baek Y, Park Y. Intensity-based holographic imaging via space-domain Kramers-Kronig relations[J]. Nature Photonics, 2021, 15(5): 354-360.
- [35] Baek Y, Lee K, Shin S, et al. Kramers-Kronig holographic imaging for high-space-bandwidth product[J]. Optica, 2019, 6(1): 45-51.
- [36] Huang Z Z, Cao L C. High bandwidth-utilization digital holographic multiplexing: an approach using Kramers-Kronig relations[J]. Advanced Photonics Research, 2022, 3(2): 2100273.
- [37] Venkatesh S, Schurig D. Computationally fast EM field propagation through axi-symmetric media using cylindrical harmonic decomposition[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 29246-29268.
- [38] Zhang W H, Zhang H, Jin G F. Adaptive-sampling angular spectrum method with full utilization of space-bandwidth product[J]. Optics Letters, 2020, 45(16): 4416-4419.
- [39] Gao Y H, Cao L C. Projected refractive index framework for multi-wavelength phase retrieval[J]. Optics Letters, 2022, 47(22): 5965-5968.
- [40] Zhang W X, Man T L, Zhang M H, et al. Computational adaptive holographic fluorescence microscopy based on the stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Biomedical Optics Express, 2022, 13(12): 6431-6442.
- [41] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35: 237-246.
- [42] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [43] Pedrini G, Osten W, Zhang Y. Wave-front reconstruction from a sequence of interferograms recorded at different planes[J]. Optics Letters, 2005, 30(8): 833-835.
- [44] Liu Z J, Guo C, Tan J B, et al. Iterative phase-amplitude retrieval with multiple intensity images at output plane of gyrator transforms[J]. Journal of Optics, 2015, 17(2): 025701.
- [45] Bucu C R L, Almoró P F. Enhanced multiple-plane phase retrieval using adaptive support[J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 6045-6048.
- [46] Binamira J F, Almoró P F. Accelerated single-beam multiple-intensity reconstruction using unordered propagations[J]. Optics Letters, 2019, 44(12): 3130-3133.
- [47] Faulkner H M L, Rodenburg J M. Movable aperture lensless transmission microscopy: a novel phase retrieval algorithm[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(2): 023903.
- [48] Rodenburg J M, Faulkner H M L. A phase retrieval algorithm for shifting illumination[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(20): 4795-4797.
- [49] Miao J W, Murnane M M. A closer look at spin textures [J]. Nature Nanotechnology, 2023, 18(1): 1-2.
- [50] Maiden A M, Rodenburg J M. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging[J]. Ultramicroscopy, 2009, 109(10): 1256-1262.
- [51] Maiden A, Johnson D, Li P. Further improvements to the ptychographical iterative engine[J]. Optica, 2017, 4(7): 736-745.
- [52] Sidorenko P, Cohen O. Single-shot ptychography[J]. Optica, 2015, 3(1): 9-14.
- [53] Wen X, Geng Y, Guo C, et al. A parallel ptychographic iterative engine with a co-start region[J]. Journal of Optics, 2020, 22(7): 075701.
- [54] Chang C C, Pan X C, Tao H, et al. 3D single-shot ptychography with highly tilted illuminations[J]. Optics Express, 2021, 29(19): 30878-30891.
- [55] Wen X, Zhou X Y, Li Y T, et al. High-performance lensless diffraction imaging from diverse holograms by three-dimensional scanning[J]. Optics Letters, 2022, 47

- (14): 3423-3426.
- [56] Liu Y Y, Liu Q W, Li Y, et al. High-resolution multi-wavelength lensless diffraction imaging with adaptive dispersion correction[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7197-7209.
- [57] Zhang F C, Chen B, Morrison G R, et al. Phase retrieval by coherent modulation imaging[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13367.
- [58] Song L, Lam E Y. Fast and robust phase retrieval for masked coherent diffractive imaging[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(3): 758-768.
- [59] Wu Y C, Sharma M K, Veeraraghavan A. WISH: wavefront imaging sensor with high resolution[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 44.
- [60] Xu C, Pang H, Cao A X, et al. Phase retrieval by random binary amplitude modulation and ptychography principle[J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 14505-14517.
- [61] Yu X L, Wang K W, Xiao J J, et al. Recording point spread functions by wavefront modulation for interferenceless coded aperture correlation holography[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 409-412.
- [62] Xu C, Yuan W, Cao A X, et al. Enhancing multi-distance phase retrieval via unequal interval measurements [J]. *Photonics*, 2021, 8(2): 48.
- [63] Zhou X Y, Wen X, Ji Y, et al. Fast automatic multiple positioning for lensless coherent diffraction imaging[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 155: 107055.
- [64] Oh J, Hugonnet H, Park Y. Quantitative phase imaging via the holomorphic property of complex optical fields[J]. *Physical Review Research*, 2023, 5(2): L022014.
- [65] de Kronig L R. On the theory of dispersion of X-rays[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1926, 12(6): 547-557.
- [66] Shen C, Liang M S, Pan A, et al. Non-iterative complex wave-field reconstruction based on Kramers-Kronig relations[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(6): 1003-1012.
- [67] Lee C, Baek Y, Hugonnet H, et al. Single-shot wide-field topography measurement using spectrally multiplexed reflection intensity holography via space-domain Kramers-Kronig relations[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(5): 1025-1028.
- [68] Li Y T, Shen C, Tan J B, et al. Fast quantitative phase imaging based on Kramers-Kronig relations in space domain[J]. *Optics Express*, 2021, 29(25): 41067-41080.
- [69] Li Y T, Wen X, Sun M, et al. Spectrum sampling optimization for quantitative phase imaging based on Kramers-Kronig relations[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(11): 2786-2789.
- [70] Li Y T, Huang G C, Ma S, et al. Single-frame two-color illumination computational imaging based on Kramers-Kronig relations[J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(14): 141107.
- [71] Zhang X D, Liu Z Q, Jiang M S, et al. Fast and accurate auto-focusing algorithm based on the combination of depth from focus and improved depth from defocus[J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31237-31247.
- [72] Wang Z J, Lei M, Yao B L, et al. Compact multi-band fluorescent microscope with an electrically tunable lens for autofocusing[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(11): 4353-4364.
- [73] Ye M, Chen X X, Li Q C, et al. Depth from defocus measurement method based on liquid crystal lens[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28413-28420.
- [74] Bathe-Peters M, Annibale P, Lohse M J. All-optical microscope autofocus based on an electrically tunable lens and a totally internally reflected IR laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2359-2368.
- [75] Hsu W Y. Automatic compensation for defects of laser reflective patterns in optics-based auto-focusing microscopes[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(4): 2034-2044.
- [76] Bian Z C, Guo C F, Jiang S W, et al. Autofocusing technologies for whole slide imaging and automated microscopy[J]. *Journal of Biophotonics*, 2020, 13(12): e202000227.
- [77] Cao J, Cheng Y, Wang P, et al. Autofocusing imaging system based on laser ranging and a retina-like sample[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(22): 6222-6229.
- [78] Cao J, Cheng Y, Wang P, et al. Method based on bioinspired sample improves autofocusing performances [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(10): 103103.
- [79] Hao Q, Xiao Y Q, Cao J, et al. Improving the performances of autofocus based on adaptive retina-like sampling model[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 269-276.
- [80] Kehtarnavaz N, Oh H J. Development and real-time implementation of a rule-based auto-focus algorithm[J]. *Real-Time Imaging*, 2003, 9(3): 197-203.
- [81] Lesage A J, Kron S J. Design and implementation of algorithms for focus automation in digital imaging time-lapse microscopy[J]. *Cytometry*, 2002, 49(4): 159-169.
- [82] He J, Zhou R Z, Hong Z L. Modified fast climbing search auto-focus algorithm with adaptive step size searching technique for digital camera[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(2): 257-262.
- [83] Xiong Y, Shafer S A. Depth from focusing and defocusing[C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 15-17, 1993, New York, NY, USA. New York: IEEE Press, 2002: 68-73.
- [84] Dubois F, Schockaert C, Callens N, et al. Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis[J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 5895-5908.
- [85] Yan X Y, Lei J, Zhao Z. Multidirectional gradient neighbourhood-weighted image sharpness evaluation algorithm[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-7.
- [86] Sun Y, Duthaler S, Nelson B J. Autofocusing in computer microscopy: selecting the optimal focus algorithm[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2004, 65(3): 139-149.
- [87] Moreno G, Ascano J S, Ricardo J O, et al. A new

- focus detection criterion in holograms of planktonic organisms[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2020, 138: 497-506.
- [88] Langehanenberg P, Kemper B, Dirksen D, et al. Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for live cell imaging[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(19): D176-D182.
- [89] Choi Y S, Lee S J. Three-dimensional volumetric measurement of red blood cell motion using digital holographic microscopy[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(16): 2983-2990.
- [90] Guo C, Zhao Y X, Tan J B, et al. Adaptive lens-free computational coherent imaging using autofocusing quantification with speckle illumination[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14407-14420.
- [91] Guo C, Tan J B, Liu Z J. Precision influence of a phase retrieval algorithm in fractional Fourier domains from position measurement error[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(22): 6940-6947.
- [92] Dubois F, El Mallahi A, Dohet-Eraly J, et al. Refocus criterion for both phase and amplitude objects in digital holographic microscopy[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4286-4289.
- [93] Lyu M, Yuan C J, Li D Y, et al. Fast autofocusing in digital holography using the magnitude differential[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): F152-F157.
- [94] Yang C P, Chen M H, Zhou F F, et al. Accurate and rapid auto-focus methods based on image quality assessment for telescope observation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 658.
- [95] Sun Y, Duthaler S, Nelson B J. Autofocusing algorithm selection in computer microscopy[C]//2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, August 2-6, 2005, Edmonton, Alta. New York: IEEE Press, 2005: 70-76.
- [96] Gillespie J, King R A. The use of self-entropy as a focus measure in digital holography[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1989, 9(1): 19-25.
- [97] Tsai D Y, Lee Y, Matsuyama E. Information entropy measure for evaluation of image quality[J]. *Journal of Digital Imaging*, 2008, 21(3): 338-347.
- [98] Ren Z B, Chen N, Chan A, et al. Autofocusing of optical scanning holography based on entropy minimization [C]//Digital Holography & 3-D Imaging Meeting, May 24-28, 2015, Shanghai, China. Washington, DC: OSA, 2015: DT4A.4.
- [99] Memmolo P, Distanto C, Paturzo M, et al. Automatic focusing in digital holography and its application to stretched holograms[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1945-1947.
- [100] Memmolo P, Paturzo M, Javidi B, et al. Refocusing criterion via sparsity measurements in digital holography [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4719-4722.
- [101] Zhang Y B, Wang H D, Wu Y C, et al. Edge sparsity criterion for robust holographic autofocusing[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3824-3827.
- [102] 郭惠楠, 曹剑中, 周祚峰, 等. 基于色彩相关性的彩色图像清晰度评价算法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 3132-3136.
- Guo H N, Cao J Z, Zhou Z F, et al. Image definition evaluation algorithm based on color relativity[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3132-3136.
- [103] Gao P, Yao B L, Rupp R, et al. Autofocusing based on wavelength dependence of diffraction in two-wavelength digital holographic microscopy[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(7): 1172-1174.
- [104] Levandowsky M, Winter D. Distance between sets[J]. *Nature Physical Science*, 1972, 235(55): 60.
- [105] Tanimoto T T. An elementary mathematical theory of classification and prediction[M]. New York: International Business Machines Corporation, 1958.
- [106] Chung N C, Miasojedow B, Startek M, et al. Jaccard/Tanimoto similarity test and estimation methods for biological presence-absence data[J]. *BMC Bioinformatics*, 2019, 20(Suppl 15): 644.
- [107] Zhou X Y, Xiong P B, Chi D Z, et al. Fast autofocusing based on pixel difference with the Tanimoto coefficient between images[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(15): 3752-3755.
- [108] Mir H, Xu P, van Beek P. An extensive empirical evaluation of focus measures for digital photography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9023: 90230I.
- [109] Zhou X Y, Li Z Y, Qiao Z L, et al. Fast autofocusing of recorded planes by salient feature region for coherent diffraction imaging[J]. *Journal of Biophotonics*, 2023, 16(9): e202300278.
- [110] Parsons CMA. Public Health Image Library (PHIL)[EB/OL]. [2023-03-20]. <https://phil.cdc.gov/Details.aspx?pid=23288>.
- [111] 祝新力, 张雅声, 方宇强, 等. 多曝光图像融合方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(22): 2200003.
- Zhu X L, Zhang Y S, Fang Y Q, et al. Review of multi-exposure image fusion methods[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(22): 2200003.
- [112] 余海洋, 范之国, 金海红, 等. 融合图像灰度比值的离焦图像自动判别分离方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(22): 2210001.
- Yu H Y, Fan Z G, Jin H H, et al. Automatic discrimination and separation method for defocused images based on image gray ratio[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(22): 2210001.
- [113] 江会交, 尹卓异, 张琴, 等. 基于数字相关的二值条纹投影轮廓术中离焦的定量评估方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(22): 2211002.
- Jiang H J, Yin Z Y, Zhang Q, et al. Quantitative evaluation of binary defocusing in fringe projection profilometry based on digital correlation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(22): 2211002.
- [114] 王金沙, 巩岩, 高志山, 等. 双波段长后工作距连续变焦光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(21): 2122004.
- Wang J S, Gong Y, Gao Z S, et al. Design of dual-band optical system with long back working distance and continuous zoom[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,

- 2023, 60(21): 2122004.
- [115] 罗天琦, 邓小娟, 刘畅, 等. 聚焦堆栈中空间几何结构的深度估计[J]. 光学学报, 2023, 43(20): 2010001.
Luo T Q, Deng X J, Liu C, et al. Depth estimation based on spatial geometry in focal stacks[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(20): 2010001.
- [116] 陈小威, 朱文越, 钱仙妹, 等. 聚焦高斯光束湍流大气传输的定标模型[J]. 中国激光, 2023, 50(22): 2205001.
Chen X W, Zhu W Y, Qian X M, et al. Scale model of focused Gaussian beam propagating in turbulent atmosphere [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(22): 2205001.
- [117] Harris C G, Stephens M J. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988, September, 1988, Manchester. London: Alvey Vision Club, 1988.
- [118] Jing J F, Gao T, Zhang W C, et al. Image feature information extraction for interest point detection: a comprehensive review[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2023, 45(4): 4694-4712.