

数字全息显微中相位像差校正技术综述

何伟林 杨忠明 张行愚 刘兆军

Review of phase aberration correction technology of digital holographic microscopy

HE Weilin, YANG Zhongming, ZHANG Xingyu, LIU Zhaojun

引用本文:

何伟林, 杨忠明, 张行愚, 等. 数字全息显微中相位像差校正技术综述[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 249–261. DOI: 10.5768/JAO202445.0209002

HE Weilin, YANG Zhongming, ZHANG Xingyu, et al. Review of phase aberration correction technology of digital holographic microscopy[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(2): 249–261. DOI: 10.5768/JAO202445.0209002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0209002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于波像差判据的同步相移显微干涉检焦方法

Synchronous phase-shifting microscopic interference focal detection method based on wave aberration criteria

应用光学. 2021, 42(4): 703–708 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403002>

同轴收发卡式系统加入平板后的像差校正研究

Aberration correction of coaxially receiving/emitting Cassegrain system after adding flat

应用光学. 2018, 39(6): 796–802 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601006>

基于离轴数字全息改善散斑自相关重建效果

Improving effect of speckle autocorrelation reconstruction based on off-axis digital holography

应用光学. 2021, 42(2): 262–267 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0202002>

渐进多焦点镜片波前像差的扩束测量方法

Method for measuring wavefront aberration of progressive multi-focus lens based on beam expanding system

应用光学. 2018, 39(1): 88–92 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0103002>

光束斜入射的折反射组合光学系统的像差计算

Aberration calculation of catadioptric combined optical system with oblique incidence

应用光学. 2021, 42(2): 236–241 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0201005>

相位编码条纹投影轮廓术的相位展开误差校正方法

Phase unwrapping errors correction for phase-encoding based on fringe projection profilometry

应用光学. 2020, 41(5): 978–983 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0502007>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0249-13

数字全息显微中相位像差校正技术综述

何伟林, 杨忠明, 张行愚, 刘兆军

(山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237)

摘要: 数字全息显微技术是数字全息技术与显微技术的结合, 兼备两种技术的优点, 为微纳领域的定量三维测量提供了一种无损、无标记、准确和近实时的测量手段。然而, 由于元件缺陷和失调以及环境扰动等原因, 会在数字全息显微测量结果中额外引入相位像差。为了获得准确的定量相位测量结果, 必须对像差成因和主要成分进行分析, 然后补偿和校正像差。这篇综述介绍了数字全息显微成像测量中主要的像差来源和影响, 基于实现的方式对现有的像差校正方法进行了综述, 并展望了未来像差校正领域的发展方向, 为从事数字全息检测研究的研究者提供参考。

关键词: 数字全息; 干涉测量; 定量检测; 相位像差; 像差校正

中图分类号: TN26; O436.1; O438.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0209002

Review of phase aberration correction technology of digital holographic microscopy

HE Weilin, YANG Zhongming, ZHANG Xingyu, LIU Zhaojun

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China)

Abstract: Digital holographic microscopy is a combination of digital holography and microscopy, combining the advantages of both technologies, which provides a non-destructive, label-free, accurate and near real-time measurement method for quantitative 3D measurement in the micro-nano field. However, phase aberrations are additionally introduced due to component defects, misalignment, and environmental disturbances in the digital holographic microscopy measurement results. To obtain accurate quantitative phase measurement results, the origin and principal components of aberrations must be analyzed, and then compensate and corrected for aberrations. This review began with an introduction to the main sources and effects of aberrations in digital holographic microscopy imaging measurement. Then, the existing aberration correction methods were reviewed based on their different workflows and characteristics. Finally, the future development direction of aberration correction was prospected, which would provide useful references for researchers engaged in digital holographic detection research.

Key words: digital holography; interferometry; quantitative detection; phase aberration; aberration correction

引言

数字全息显微技术(digital holographic microscopy, DHM)是传统数字全息技术(digital holographic, DH)与光学显微测量技术的结合, 是一种具有无损、无标记、准确和近实时测量的定量相位测量手段^[1-2]。到目前为止, 数字全息显微技术已经在细胞生物学分析^[2-3]、微结构测量^[4]、粒子跟踪^[5]、

微流控计量学^[6]和神经科学^[7]等领域得到广泛应用。

数字全息显微技术的测量是通过反射或者透射的方式, 使一束光(物光)受被测样品的调制, 并与另一束光(参考光)发生干涉。样品的高度、形貌或者折射率分布等物理量导致了2束光之间的相位差, 并以干涉条纹的形式被相机记录。

收稿日期: 2023-04-26; 修回日期: 2023-08-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62175131)

作者简介: 何伟林(1995—), 男, 博士, 博士后, 主要从事计算光学成像、超表面设计等技术研究。E-mail: weilin.he@sdu.edu.cn

通信作者: 杨忠明(1987—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学干涉检测、光学系统设计、计算光学成像等技术研究。

E-mail: zhongming.yang@sdu.edu.cn

从记录的条纹中解调、重建相位,再由相位转化为对应的物理量,即实现定量的三维测量。然而,实际干涉条纹中的相位信息并非仅由样品相位组成,其中还会包含一些由各种实验和系统误差,以及测量方法本身带来的额外相位,即相位像差。像差导致的相位畸变会叠加在结果的相位图像中,严重影响相位测量精度,只有对其进行校正后才能实现精确的定量测量。

本文介绍了数字全息显微镜的基本结构和数字全息显微干涉中的相位像差,对目前相位像差的各种物理和数值校正技术进行了综述,介绍了一些具有代表性的像差校正方法,为数字全息显微测量领域的研究者提供参考。

1 数字全息显微镜基本结构

1.1 数字全息显微测量

数字全息显微成像测量一般分为数字全息记录、相位信息提取、相位像差校正三个步骤,如图 1 所示。首先,通过特定干涉仪结构,利用显微物镜(microscope objective, MO)记录含待测物相位的数字全息图,然后利用合适的算法从全息图条纹中获取相位信息,最后分析像差来源并进行像差的补偿和校正。本文使用了巨噬细胞相位^[8]作为理想物进行全息图和相位图仿真以辅助说明。

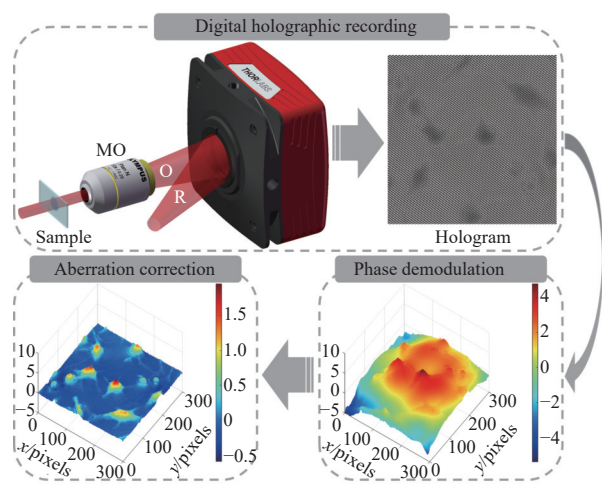


图 1 数字全息显微定量相位测量过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of quantitative phase measurement of digital holographic microscopy

1.2 数字全息显微干涉光路

目前,数字全息显微测量常用的干涉光路主要是基于迈克尔逊干涉光路和马赫-曾德尔干涉光路发展而来,二者都是分振幅式干涉光路,其中前者

更适合于反射式测量,而后者更适合于透射式测量。2 种基本的干涉光路对应的典型全息显微干涉光路如图 2 所示。

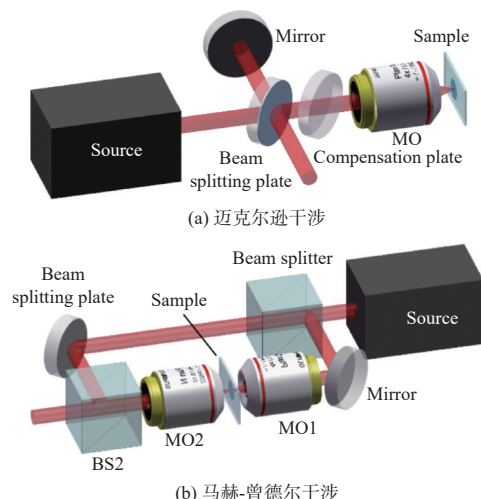


图 2 两种典型的全息显微干涉光路示例

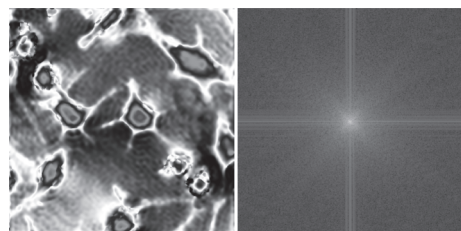
Fig. 2 Two typical holographic microscopy examples

迈克尔逊干涉仪通过调节反射镜的角度和位置,可实现等厚、等倾两种干涉的切换和干涉臂长度的调控。此外,改变一侧光路经过的介质也会改变光程。因此,基于迈克尔逊干涉的测量方法已经在微小位移^[9]、光波长^[10]和介质折射率^[11]等测量领域得到广泛应用。

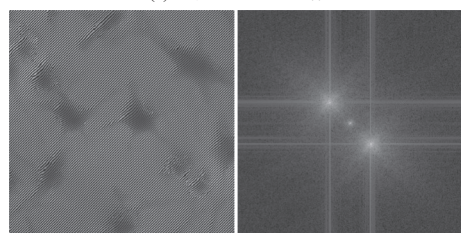
马赫-曾德尔干涉仪^[12-13]将待测物直接放入物光光路,可通过控制反射镜改变干涉光路中物光和参考光之间的角度,其结构简单,搭建灵活,且由于物光和参考光光路互相独立,避免了回波影响,在光通量的利用率方面相比迈克尔逊干涉光路具有优势。

根据物光和参考光之间的角度,数字全息可分为同轴全息和离轴全息,在图 3 中展示了二者的全息图和频谱。同轴全息要求物光和参考光之间角度要尽可能小,这使其具有最高的干涉质量和条纹对比度,但其光路易受外界扰动影响,且对光路稳定性和装调精度要求较为苛刻。更重要的是,同轴全息图在进行单幅图解调时会存在“孪生像”现象,即由于其 0 级及 ± 1 级频谱同轴,解调结果除了原始像外,还会存在重合叠加的 0 级衍射像和共轭像。离轴全息是在同轴光路的基础上,在物光和参考光之间引入了一个小角度,使原始像、0 级衍射像和共轭像互相分离。如图 4 所示,当待测物 G_0 的最高空间频率为 B ,即带宽为 $2B$ 时,三者完全分离并消除“孪生像”影响的条件为 $\alpha \geq 3B$ (其

中 $\alpha=(\sin\theta)/\lambda$ 为空间频率), 因此可得最小分离角度 $\theta_{\min}=\arcsin(3B\lambda)$ 。



(a) 同轴全息图及频谱



(b) 离轴全息图及频谱

图3 同轴和离轴全息的全息图及频谱

Fig. 3 Hologram and spectrum of on-axis and off-axis holography

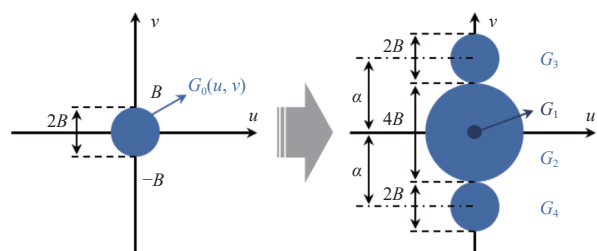


图4 全息图中频谱重叠与分离示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spectral overlap and separation in holography

由于同轴全息和离轴全息在频谱特征上的较大区别, 它们需要采用不同的相位提取方法。同轴全息图的解调通常使用相移法^[14-15], 将移相器与参考臂的反射镜集成, 移相并采集多幅全息图用于重建。典型方法如四步相移法, 相移值为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$, 如图5所示。

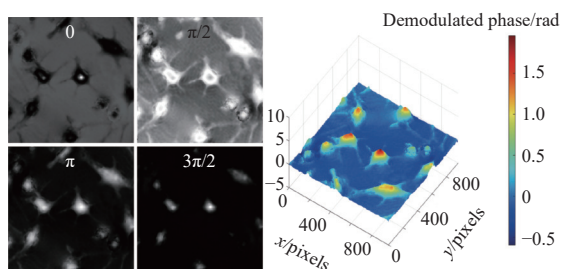


图5 四步相移法全息图及相位解调结果

Fig. 5 Hologram and phase demodulation results of four-step phase shift method

离轴全息图由于实现了0级及 ± 1 级频谱的分离, 可以使用频域滤波法^[16-17], 基于傅里叶变换从单幅全息图的频谱中取出其+1级频谱分量, 实现相位的提取重建, 如图6所示。

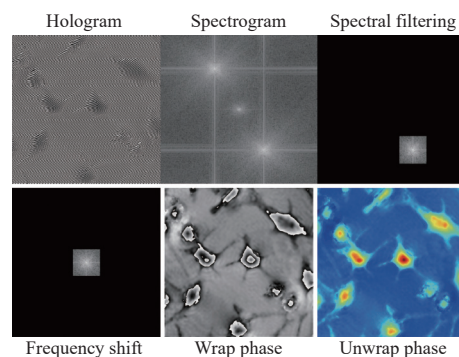


图6 频域滤波法的相位解调重建过程

Fig. 6 Phase demodulation and reconstruction process of frequency domain filtering method

在同轴全息和离轴全息之间, 还存在一种特别的情况, 即略微离轴的全息^[18]。这种情况下, ± 1 级频谱互相分开, 但仍与背景重叠, 如图7所示。图7中 ACT (autocorrelation terms) 代表0级频谱的自相关项, CCT (crosscorrelation terms) 代表 ± 1 级频谱的互相关项。此时, 每次测量所需的最高空间频率仅为传统离轴全息测量的一半, 适合当相机所允许的最高空间频率不足以将0级及 ± 1 级频谱完全分开的情况。对于略微离轴的全息, 尽管实像和虚像恰好分开, 但它们仍和背景重叠, 不能通过频域滤波法来提取相位, 而是需要结合相移技术采集至少2幅干涉图。因此, 略微离轴的全息与传统的离轴全息相比对相机带宽要求更低, 与传统的同轴全息相比对测量的要求更少^[18]。

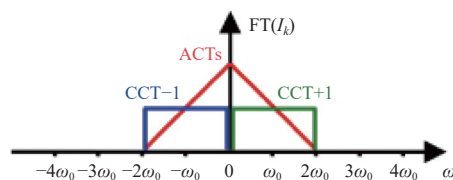


图7 略微离轴干涉测量的空间频域示意图^[18]

Fig. 7 Schematic diagram of spatial-frequency domain for slightly off-axis interferometry

2 数字全息显微干涉中的相位像差

2.1 相位像差的产生与影响

数字全息显微测量得到的相位结果通常与实际待测物相位存在差异, 即存在相位像差, 例如倾

斜、离焦、球差、彗差、场曲、像散、畸变等。数字全息显微测量中,物光与参考光干涉产生全息图^[8],从全息图提取出相位并展开后可表示为^[19]

$$\varphi(x, y) = \varphi_o(x, y) + \varphi_a(x, y) + \varphi_e(x, y) \quad (1)$$

式中: φ_o 为被测物相位; φ_a 为相位像差; φ_e 为与残余噪声相关的误差。其中,像差 φ_a 中包括倾斜、二次以及高阶像差^[8, 19]:

$$\varphi_a(x, y) = (l_x x + l_y y) + (K_x x^2 + K_y y^2) + \varphi_h(x, y) \quad (2)$$

式中: l_x 和 l_y 表示倾斜系数; K_x 和 K_y 表示二次因子; φ_h 表示高阶相位像差。

在相位像差中,一次项和二次项,即倾斜像差和球差、离焦等透镜像差通常是主要成分^[20],因其相位起伏程度比较大,甚至会导致被测物“淹没”在像差中而无法清晰分辨形状:1) 离轴全息测量通过引入“离轴角”解决了“孪生像”,能从单幅全息图中重建相位^[16-17],具有高时间分辨率,但也引入了倾斜像差,如图8(a)所示;2) 为提高系统横向分辨率,数字全息显微测量光路中引入了显微物镜,物镜本身存在的像差、由物镜位置失调引入的物光与参考光间的相位曲率不匹配等因素会带来离焦等二次项透镜像差^[21-22],在结果中出现球形突起或者凹陷状的相位畸变,如图8(b)所示。

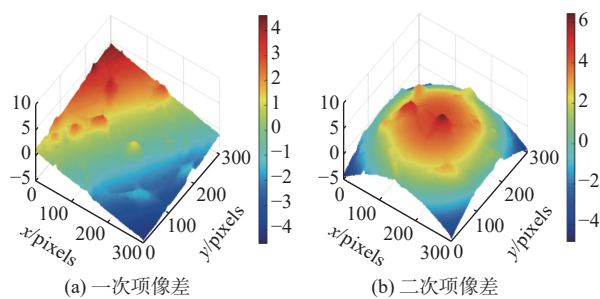


图8 全息显微中的主要像差

Fig. 8 Main phase aberrations in holographic microscopy

此外,系统中元件的缺陷或表面损伤、装调中各个元件位置与角度的失配、环境或样品中不均匀分布的折射率、测量环境的不稳定等多种复杂因素也会导致结果中存在各种各样的高阶像差,补偿难度更高,且主要影响对测量目标的高精度定量表征。

2.2 相位像差的表征

数字全息显微中的相位像差可以通过幂级数展开的多项式进行数学描述和定量表征,Zernike多项式^[23-24]和Chebyshev多项式^[25]就是最常见的正交多项式形式,已被广泛用于光学测试和波前分析中。Zernike多项式和Chebyshev多项式中的各项分别具有不同的物理意义,可以表征不同的像差分量,如图9所示。

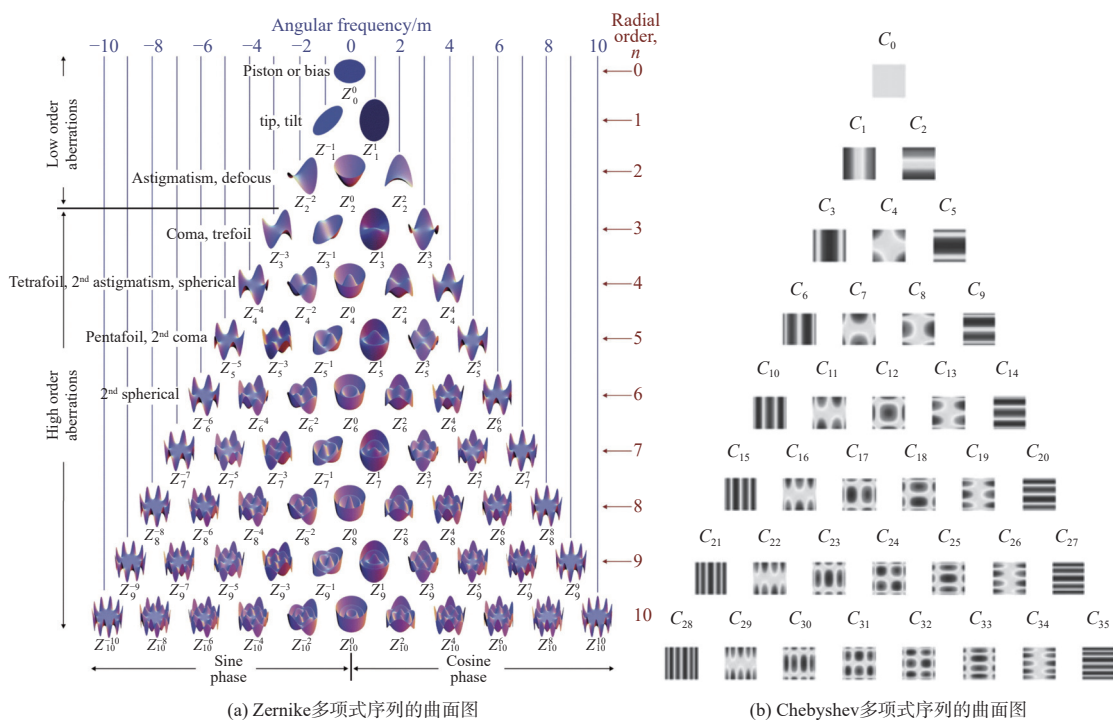


图9 泽尼克(Zernike)多项式^[24]和切比雪夫(Chebyshev)多项式^[25]各项序列的曲面图

Fig. 9 Surface plot of Zernike polynomial and Chebyshev polynomial sequences

其中, Zernike 多项式因其在单位圆孔径上的正交性可以描述圆形孔径的经典像差^[23]:

$$\begin{cases} Z_n^m(\rho, \theta) = \left[\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}} \right]^{\frac{1}{2}} R_n^m(\rho) \cos(m\theta) \\ R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s \right)! \left(\frac{n-m}{2} - s \right)!} \rho^{n-2s} \end{cases} \quad (3)$$

式中: (ρ, θ) 是单位圆孔径上的极坐标; n 和 m 是包括 0 和 $n-m>0$ 的正整数; δ_{ij} 是克罗内克符号 (Kronecker delta)。Zernike 多项式在单位圆孔径上的正交性可以描述为^[23]

$$\begin{cases} \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} Z_n^m(\rho, \theta) Z_{n'}^{m'}(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta = \delta_{nn'} \delta_{mm'} \\ \int_0^{2\pi} \cos(m\theta) \cos(m'\theta) d\theta = \pi(1+\delta_{m0}) \delta_{mm'} \\ \int_0^1 R_n^m(\rho) R_{n'}^m(\rho) \rho d\rho = \frac{1}{2(n+1)} \delta_{nn'} \end{cases} \quad (4)$$

而对于矩形孔径, 需使用在矩形孔径下正交的 Chebyshev 多项式进行像差表征与补偿。二维 Chebyshev 多项式的正交性可以描述为^[25]

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 C_n(x, y) C_m(x, y) \frac{dx dy}{\sqrt{1-x^2} \sqrt{1-y^2}} = \begin{cases} 0, n \neq m \\ K, n = m \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\sqrt{1-x^2} \sqrt{1-y^2}$ 是二维加权函数, 仅需对 x 或者 y 方向进行缩放即可保持 Chebyshev 多项式在任意矩形孔径上的正交性。

因此, 理论上任意的相位像差都可以由多项式表征, 且多项式阶数越高, 项数越多, 其能表征的像差越复杂、越精确。需要注意的是, 如果多项式在目标孔径上失去正交性, 会导致较大拟合误差, 必须对其进行高计算成本的多项式变换, 以满足目标孔径上的正交性^[26]。

3 数字全息显微测量的相位像差校正

由于相位像差对测量精度和准确性的影响, 像差校正是数字全息显微测量中必不可少的环节。研究者们已提出许多像差校正方法, 基于其实现方式可分为物理方法和数值方法两类。

3.1 像差的物理校正方法

像差的物理校正方法是通过调整硬件来消除像差的影响, 如对光路元件的特定调节、特殊光路结构的优化设计等, 其大多存在元件昂贵、系

统复杂、以及测量环境和装调精度要求高等问题。典型的物理方法有二次曝光法^[27-28]、可调镜头法^[13, 29]、远心结构法^[30-31]和共光路干涉法^[32-37]等。

3.1.1 二次曝光法

二次曝光法^[27-28]是在测试系统和测试环境稳定性较高的前提下, 分别记录放入待测物和未放入待测物 2 种情况下的全息图。然后对测得的 2 幅全息图进行同样的相位提取和解包裹等处理, 分别得到包含系统像差的待测物相位和系统像差相位。最后, 二者相减即可实现像差的校正, 如图 10 所示。

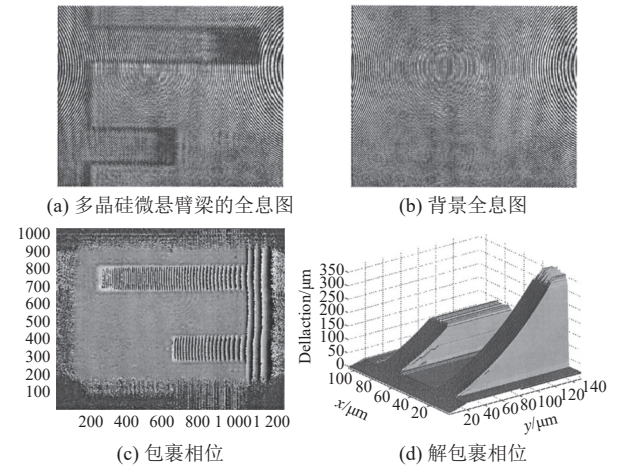


图 10 二次曝光法通过相位相减实现相位畸变补偿校正^[27]

Fig. 10 Phase distortion correction by phase subtraction in double exposure

二次曝光法存在鲁棒性较差的问题, 对测量环境和系统的稳定性要求高, 但对光路调节精度要求低, 仅需移除待测物后再次采集一幅全息图即可补偿所有系统像差。虽然二次曝光法受二次采集过程中环境影响和操作导致的人为误差而难以实现可靠的高精度定量补偿, 但在扰动比较小的时候仍然能得到较好的定性观察效果。因此, 其作为一种原理和操作都比较简单的方法, 非常适合研究者的初步定性观察测量。

3.1.2 可调镜头和远心结构法

可调镜头法^[13, 29]是通过一个位置^[13]或者焦距^[29]可调的镜头, 实现对光路中离焦程度的调控, 如图 11 所示。作为数字全息显微测量中的主要像差之一, 离焦像差的成因是 2 个光路中显微物镜位置、放大倍率等不完全一样, 导致了物光与参考光中由镜头引入的离焦程度不一致。因此, 调节镜头使 2 个光路间由镜头引入的离焦量差异越小, 光

路中的离焦像差就越小。这种方法原理很简单,但是装调困难,难以完全消除离焦像差,而如果使用高精度的位移或者电控变焦透镜,会带来成本的巨大提高。此外,此方法仅能够校正离焦像差。

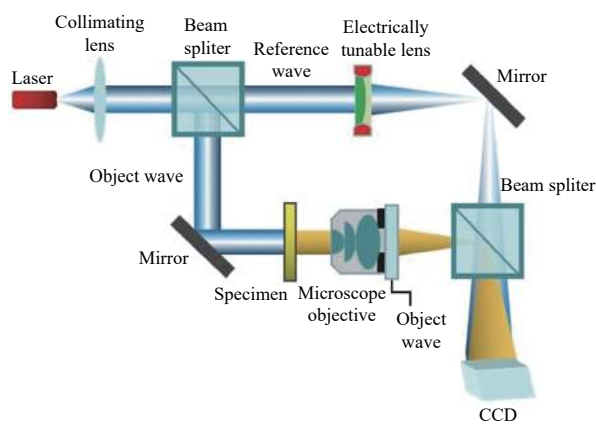


图 11 位置可调镜头示意图^[13]

Fig. 11 Schematic diagram of position-adjustable lens

远心结构法^[30-31]是通过将光路设置为远心系统来减小小像差的影响,是一种纯硬件调节方法,其基本思想和实现方式与可调镜头法相似,也存在装调困难的问题。在远心结构法的光路中,光源经过了良好准直,并分为参考光和物光。物光中仍然使用显微物镜放大样品来提高测量分辨率,但在显微物镜之后还存在镜头,保证合束前的物光仍是和参考光一样良好准直的平行光,因此物光和参考光之间的离焦量是相同的,如图 12 所示。由于远心系统的平移不变性^[30],成像不会失真,仅是待测物的缩放。

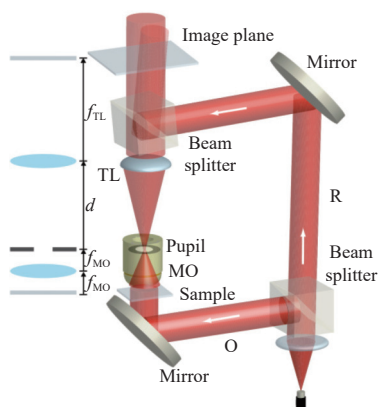


图 12 远心结构配置法示意图^[30-31]

Fig. 12 Schematic diagram of telecentric structure configuration method

可调镜头与远心结构法可通过调节透镜位置对由透镜引入的离焦像差进行校正,虽然通常手

动调节光路容易残余部分离焦像差,难以实现高精度的校正,但此类方法属于实时校正,适用于低精度高时间分辨率要求的应用,还可以通过使用精密位移装置或者变焦透镜,以提高硬件成本为代价进一步提高离焦像差校正能力。

3.1.3 共光路干涉法

共光路干涉法^[32-37]是通过巧妙的光路系统设计,使物光与参考光尽可能经过相同的路径传播,即形成物参共路干涉结构,避免元件失调、元件振动、气流扰动等因素的影响。共光路干涉法有 2 种实现方式:一种方式是分束,典型的有基于光栅和滤波等形式^[32-33],即分离不同衍射级作为物光和参考光,如图 13 所示。还有基于分光棱镜的结构,经待测物和放大系统后,利用分光棱镜实现分束,并利用点衍射的方式得到理想的参考光^[34],如图 14 所示。另一种方式是自参考^[35-37],将光束中未包含被测物信息的一部分作为参考光,典型的方法有如图 15 所示的基于反射镜^[35]的自参考干涉结构。

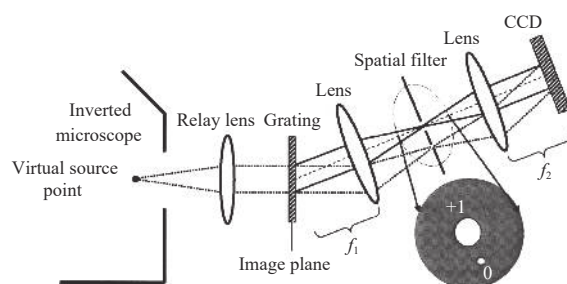


图 13 使用光栅和空间滤波的共路数字全息^[32]

Fig. 13 Common path digital holography using grating and spatial filtering

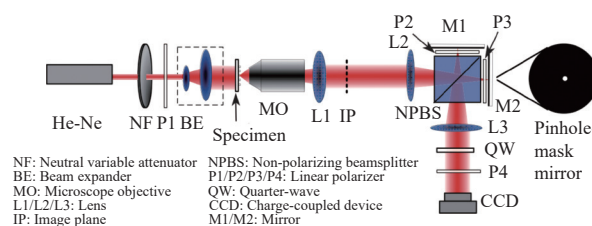


图 14 基于分光棱镜和点衍射的共路数字全息^[34]

Fig. 14 Common path digital holography based on beam-splitting prism and point diffraction

共光路干涉法共有的特点是抗干扰性强,其中基于分束的方法光路设计和调节难度大,但无视场限制,可用于大视场范围内密集待测样品的测量,而基于自参考的方法使用的元件更少,光路更易调节,抗干扰性更高,但存在干涉光程难以调节

和视场受限的情况, 仅适合稀疏分布样品的测量。总体来说, 共光路干涉法在低环境稳定性的情况下具有更大优势。

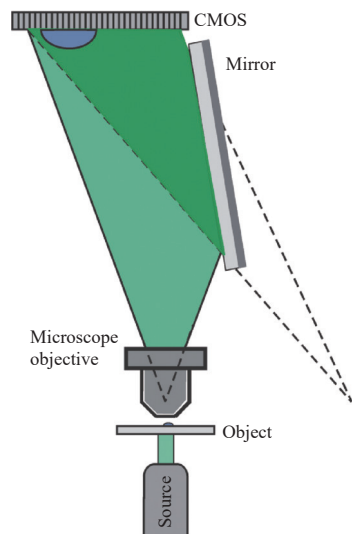


图 15 使用洛埃镜的自参考共光路数字全息显微装置^[35]

Fig. 15 Device for self-referencing common optical path digital holographic microscopy using Lloyd's mirror

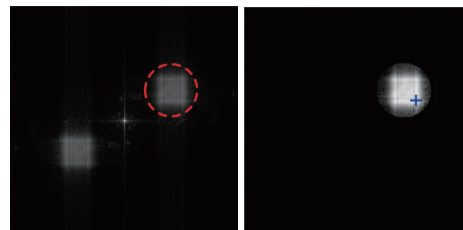
3.2 像差的数值校正方法

像差的数值校正方法是通过特定数值算法, 计算得到一个模拟的像差掩模, 然后从包含像差的相位结果中减去计算的模拟像差进行补偿, 或者是配合特定的测量方式, 巧妙地直接分离像差和被测物相位。典型的数值方法有频谱分析法^[38-39]、亚像素平移法^[40-41]、主成分分析法^[8, 42-43]、多项式拟合法^[25, 44-48]和基于深度学习的方法^[49-51]等。

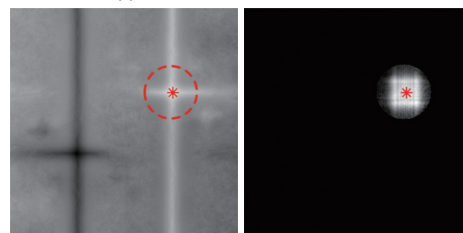
3.2.1 频谱分析法

频谱分析法^[38-39]是对传统基于频域滤波^[16-17]的单幅全息图相位解调方法的改进。频谱分析法的基本原理是分析频域滤波中影响结果的因素, 通过数值处理进行补偿。典型的方式有利用特定算法更精确地定位频谱中+1级分量的中心, 如利用全息图频谱相位中的最大值定位+1级分量中心^[38], 解决传统的直接寻找全息图频谱幅度最大值作为+1级分量中心时不准确的问题, 如图 16 所示。或者分析频谱得到更合适的滤波窗口的形状, 最终实现更精确的频谱移动、+1级信息保留以及背景噪声滤除等, 如基于区域增长的自适应空间滤波^[39], 其将频谱中最大值点设置为种子点, 通过分析频谱的强度值分布确定阈值, 并将种子点周边像素点中与种子点差值小于阈值的点作为区域增长的结果, 获得了适应性更高的滤波窗形状,

保证了+1级分量频谱的完整提取, 如图 17 中 PSFM 线框所示(图中的 MSFM 和 ASFM 线框分别为手动选取滤波窗口和直接频谱阈值滤波窗口)。



(a) 全息频谱幅度与幅度最大值



(b) 全息频谱解包裹相位及以相位最大值为中心的频谱滤波

图 16 基于全息图的频谱边带定位+1级分量的中心点^[38]

Fig. 16 Center point located at +1-order component based on spectral sidebands of hologram

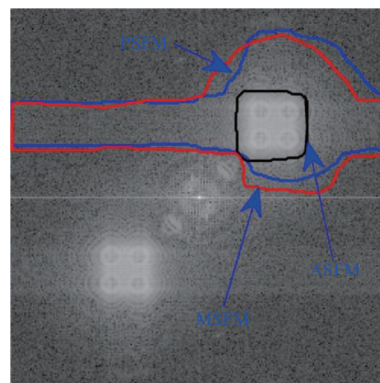


图 17 不同空间滤波法的滤波窗口^[39]

Fig. 17 Filter windows for different spatial filtering methods

频谱分析法单幅图即可补偿, 原理简单, 实现方便, 计算速度快, 但是仅补偿离轴全息图固有的倾斜像差, 且受限于像素精度会存在较大的倾斜像差残余, 仅可在其余种类像差分量较小时实现非定量观测。其单独使用的实用性不高, 但此类方法中的频谱中心定位和滤波窗口确定方法对所有基于频域滤波的离轴全息像差校正方法研究都有重要的借鉴意义。

3.2.2 亚像素平移法

亚像素平移法^[40-41]可以解决通过频域滤波的方式实现相位提取和倾斜像差补偿时, 受到像素精度的限制。其原理为通过特定的数值处理方

法,在频谱中进行亚像素级别的频谱移动。典型的例如补零法^[40],通过对空域数据零填充(见图 18)即可实现频域的上采样和频谱中的亚像素平移。也有方法将频谱移动等价于复振幅的移相^[41]来实现亚像素平移。

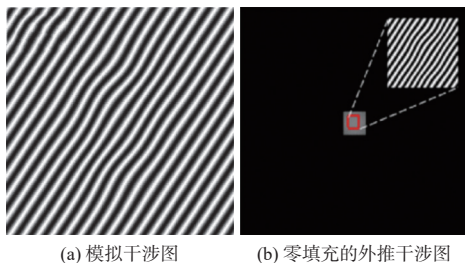


图 18 补零法示意图^[40]

Fig. 18 Schematic diagram of zero-filling method

亚像素平移法也是对传统基于频域滤波的单幅全息图相位解调方法的扩展,可以有效减少结果中残留的倾斜像差,但会增加计算复杂度,且仅仅补偿倾斜像差,可与其他频域滤波类算法结合,提供更高的精度。

3.2.3 主成分分析法

主成分分析法^[8, 42-43]通过正交变换将相位分解为一组被称为主成分的线性不相关变量,然后从中分离像差项,进而实现像差校正,如图 19 所示。这种方法可以自动将相位像差项提取到第一主成分中,然后沿 x 和 y 轴分解,将二维表面拟合和二维相位展开转换为 2 个正交方向上的一维过程,在计算效率、相位展开精度等方面具有优势。

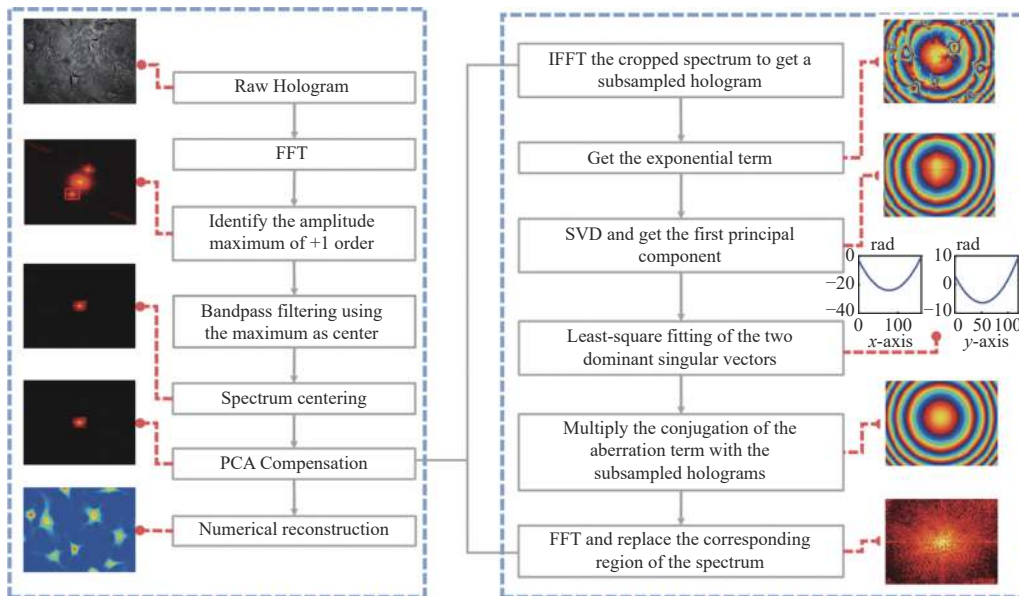


图 19 基于主成分分析(PCA)法的相位像差补偿方法框图^[42]

Fig. 19 Block diagram of PCA-based phase-aberration compensation method

主成分分析法具有单幅全息图即可补偿、计算复杂度相对较低、无需系统先验知识、低阶像差补偿效果好等优点,虽然其作为一种频域滤波类算法通常存在高阶信息部分丢失的问题,但已能适用于大部分不追求极高精度、高阶像差影响可忽略的测量情况。其仍然存在的局限性在于,像差必须在相位结果中占主导且像差能够被主成分分析算法分离出来。

3.2.4 多项式拟合法

多项式拟合法^[25-26, 44-48]通过对像差相位的拟合和相位掩模计算实现像差校正。通过对原始相位

的背景部分数据进行拟合得到多项式展开系数,再结合对应多项式的基函数计算完整的像差相位掩模,最后从原始相位中减去像差掩模实现像差校正,如图 20 所示。多项式拟合法中常用的有标准多项式拟合^[44]、基于最小二乘法的球面函数拟合^[45]、泽尼克(Zernike)多项式拟合^[46-47]、切比雪夫(Chebyshev)多项式拟合^[25, 48]等。

多项式拟合法可校正多种复杂像差,且多项式使用项数越多,阶数越高,校正精度越高,但耗费时间也越长,具有高补偿精度和高计算复杂度,适用于少量数据的超高精度定量测量。

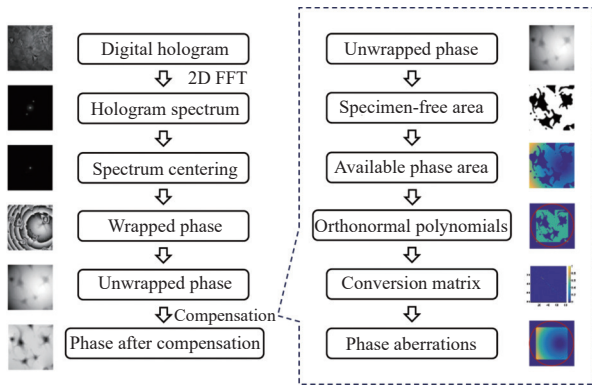


图 20 基于不规则形状孔径拟合的正交多项式自动高阶像差校正框图^[26]

Fig. 20 Block diagram of automatic high order aberrations correction based on orthonormal polynomials fitting over irregular shaped aperture

3.2.5 基于深度学习的方法

基于深度学习(CNN)的方法^[49-51]是近几年兴起并应用于数字全息像差校正中的新方法。通过大量数据采集和机器学习的过程,人们可以获得由多个卷积层组成的输入输出变换关系,最后对输入数据进行变换直接获得本需繁琐的传统计算才能获得的精确结果。例如,通过深度学习建立相位图及其中的样品和背景间的关系,从而实现快速且精确的背景识别与分割^[49-50],提高了依赖于背景识别的多项式拟合方法的处理速度和拟合精度,如图 21 所示。通过深度学习建立含像差相位与其中像差分量展开系数间的关系^[51],从而可以从输入的原始相位中直接得到其像差的展开系数,实现了快速高精度的像差校正,如图 22 所示。

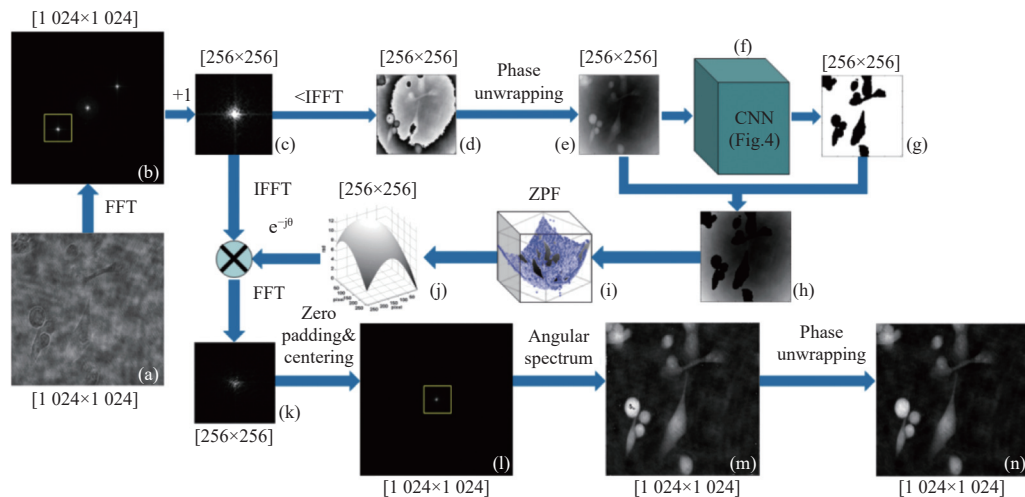


图 21 基于深度学习背景识别的泽尼克多项式拟合实现像差校正^[49]

Fig. 21 Zernike polynomial fitting based on deep learning background recognition realizes aberration correction

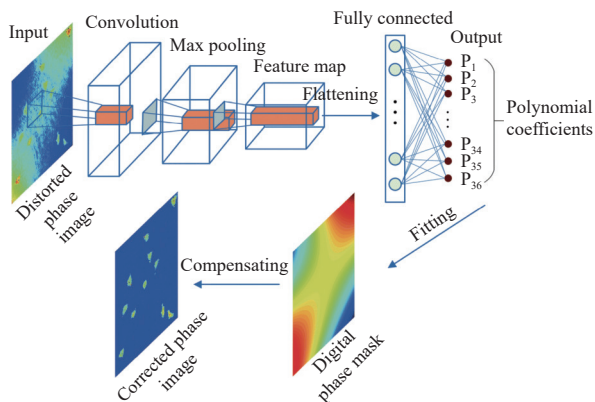


图 22 基于深度学习的自动像差补偿^[51]

Fig. 22 Automatic aberration compensation based on deep learning

深度学习方法极其依赖前期的数据库积累,只有具备超高精度定量测量的能力才能提供高质量的数据库。方法中的算法非常复杂,机器学习所需数据库要求的数据量非常庞大,建立非常困难,算法训练时间也很长,因此门槛非常高,但算法训练完成后可以实现超高精度及近实时的补偿。因此,基于深度学习的方法实现成本大,适用于对精度和实时性有极高要求的实验室研究测量、以及成熟商业仪器解决方案,如在未来商业化的全息测试仪器产品中作为算法模块。

3.3 各像差校正技术的总结

综上所述,各种校正方法根据其实现难度、校正速度以及优劣特点,适用于不同情况,如表 1 所示。二次曝光法、可调镜头法与远心结构法以其

在实现难度和补偿速度上的优势可以作为初步研究观测所用方法;共光路干涉法因其高抗环境干扰性在恶劣环境测量中具有更大优势;频谱分析和亚像素平移法的实现原理,对进一步基于频域滤波方法的研究具有重要意义;主成分分析法可以单幅图补偿各种低阶像差,能适用不追求极高精度和高阶像差影响可忽略的大部分测量情况;

多项式拟合法以高计算复杂度为代价可对多种复杂高阶像差进行补偿,实现极高的定量测量精度,可用于超高精度定量测量;基于深度学习的方法虽然实现门槛高,实现难度大,但可以实现极高的精度以及接近实时的处理速度,可用于超高精度和高时间分辨率要求的测量,有希望成为未来商业化仪器的最佳方案。

表 1 不同补偿方法的比较

Table 1 Comparison of different compensation methods

	方法	补偿类型	速度	质量	难度	应用
物理方法	二次曝光	所有像差	中等	低	非常低	极高环境稳定性测量或非定量观测
	可调镜头与远心结构	离焦	非常快	低	低	高时间分辨率要求的测量
	共光路干涉	所有像差	非常快	中等	中等	环境稳定性低的测量情况
数值方法	频谱分析	倾斜	快	低	非常低	基础研究与非定量观测
	亚像素平移	倾斜	中等	中等	低	与其他频域滤波类算法结合提供更高精度
	主成分分析	低阶像差	慢	高	中等	忽略高阶像差的大部分测量情况
	多项式拟合	所有像差	非常慢	非常高	高	少量数据的超高精度定量测量
	深度学习	所有像差	非常快	非常高	非常高	超高精度和高时间分辨率测量、商业化全息测试仪器的算法模块

4 结束语

随着科学技术的发展,对微纳领域观测的要求也越来越高,数字全息显微技术作为一种基于干涉的高敏感、无损、无标记的三维定量相位测量技术,在众多测量方法中独树一帜,具有不可忽视的地位。而像差校正技术作为数字全息显微技术测量环节中不可或缺的一部分,其发展同样受到人们重视。

目前的各种像差校正方法在优点突出的同时也面临着各自的难题:二次曝光法难以保证测量期间系统的高稳定性,包括元件、待测物和光源等的稳定性;可调镜头法和远心结构法的作用机理决定了其本身上限较低,无法校正复杂像差,且难以保证器件的装调精度,包括器件共轴、对准和调焦等;共光路干涉法难以解决光路复杂度和测量适用性之间的矛盾;频谱分析法和亚像素平移法的适用性有限;基于主成分分析的方法难以对包含高阶像差的复杂像差实现高精度全自动消除,且当测试样本相位变化低时,可能无法进行主成分分析并提供适当的补偿;多项式拟合法面临复杂像差的拟合精度和计算速度之间的矛盾;基于深度学习的方法仍属于一种“黑箱”,难以给出具体的物理理论模型解释,对其他全息显微像差校正方法的研究基础有高度依赖性。因此,研究者

们需要根据需求的测量目标和测量条件,从繁多的已有方法中进行挑选,或针对上述难题做出改进,乃至提出新的测量方法,其未来的发展方向将会是通过校正理论、实验光路和计算算法方面的优化进步,在某一点优势上实现更高水平的突破,如更高校正精度或鲁棒性等,或者是得到兼顾多种优势的普适性方法。综上所述,像差校正技术一种可能的发展趋势是物理方法和数值方法结合后的全自动补偿,如通过精确的镜头调节或者远心设置来保障低像差的测量系统,然后基于应用需求采用合适的数值方法实现像差的进一步自动补偿,而在需要极高测量质量或者作为商业测量仪器的情况下,使用深度学习的方法是一种有潜力获得极高精度与实现近实时测量的方案。

总之,数字全息显微技术及其像差校正方法已经比较成熟,并被广泛应用于各个领域的微纳定量测量中,但仍然存在极大的提升空间,并将继续为众多微纳领域相关学科的发展进步做出重大贡献。

参考文献:

[1] FLORES-MORENO J M, TORRE-IBARRA M D L, HERNANDEZ-MONTES M D S, et al. DHI contemporary methodologies: a review and frontiers[J]. [Optics and](#)

- [Lasers in Engineering](#), 2020, 135: 106184.
- [2] PARK Y, DEPEURSINGE C, POPESCU G. Quantitative phase imaging in biomedicine[J]. [Nature Photonics](#), 2018, 12(10): 578-589.
 - [3] YANG S A, YOON J, KIM K, et al. Measurements of morphological and biophysical alterations in individual neuron cells associated with early neurotoxic effects in Parkinson's disease[J]. [Cytometry Part A](#), 2017, 91(5): 510-518.
 - [4] FERRARO P, MICCIO L, GRILLI S, et al. Quantitative phase microscopy of microstructures with extended measurement range and correction of chromatic aberrations by multiwavelength digital holography[J]. [Optics Express](#), 2007, 15(22): 14591-14600.
 - [5] VERPILLAT F, JOUD F, DESBIOLLES P, et al. Dark-field digital holographic microscopy for 3D-tracking of gold nanoparticles[J]. [Optics Express](#), 2011, 19(27): 26044-26055.
 - [6] SMITH C D, BIEWER T M, GEBHART T E, et al. Measurements of dynamic surface changes by digital holography for in situ plasma erosion applications[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2021, 92(3): 033504.
 - [7] PAVILLON N, BENKE A, BOSS D, et al. Cell morphology and intracellular ionic homeostasis explored with a multimodal approach combining epifluorescence and digital holographic microscopy[J]. [Journal of Biophotonics](#), 2010, 3(7): 432-436.
 - [8] ZUO C, CHEN Q, QU W, et al. Phase aberration compensation in digital holographic microscopy based on principal component analysis[J]. [Optics Letters](#), 2013, 38(10): 1724-1726.
 - [9] WANG S, ZHAO Y, LI S. Research of aerial camera focal plane micro-displacement measurement system based on Michelson interferometer[C]//7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment. Bellingham, USA: SPIE, 2014, 9282: 552-558.
 - [10] 史少辉, 封顺珍, 牛萍, 等. 迈克耳孙干涉仪测量波长实验的研究及仿真[J]. [大学物理](#), 2019, 38(9): 24-28.
SHI Shaohui, FENG Shunzhen, NIU Ping, et al. Research and simulation of wavelength measurement experiment using Michelson interference[J]. [College Physics](#), 2019, 38(9): 24-28.
 - [11] ZHANG J, SUN H, WANG R, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a michelson fiber interferometer with a hi-bi fiber probe[J]. [IEEE Sensors Journal](#), 2013, 13(6): 2061-2065.
 - [12] KATKOVNIK V, SHEVKUNOV I A, PETROV N V, et al. Wavefront reconstruction in digital off-axis holography via sparse coding of amplitude and absolute phase[J]. [Optics Letters](#), 2015, 40(10): 2417-2420.
 - [13] DENG D, PENG J, QU W, et al. Simple and flexible phase compensation for digital holographic microscopy with electrically tunable lens[J]. [Applied Optics](#), 2017, 56(21): 6007-6014.
 - [14] ZHANG T, YAMAGUCHI I. Three-dimensional microscopy with phase-shifting digital holography[J]. [Optics Letters](#), 1998, 23(15): 1221-1223.
 - [15] TAHARA T, ITO K, KAKUE T, et al. Parallel phase-shifting digital holographic microscopy[J]. [Biomed Opt Express](#), 2010, 1(2): 610-616.
 - [16] CUCHE E, MARQUET P, DEPEURSINGE C. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography[J]. [Applied Optics](#), 2000, 39(23): 4070-4075.
 - [17] CUCHE E, DEPEURSINGE C, MARQUET P. Spatial filtering and aperture apodization in digital holographic microscopy[C]//Biomedical Optical Spectroscopy and Diagnostics. Washington, USA: Optica Publishing Group, 2000: 411-413.
 - [18] SHAKED N T, ZHU Y, RINEHART M T, et al. Two-step-only phase-shifting interferometry with optimized detector bandwidth for microscopy of live cells[J]. [Optics Express](#), 2009, 17(18): 15585-15591.
 - [19] HUANG L, YAN L, CHEN B, et al. Phase aberration compensation of digital holographic microscopy with curve fitting preprocessing and automatic background segmentation for microstructure testing[J]. [Optics Communications](#), 2020, 462: 125311.
 - [20] LIU Y, WANG Z, HUANG J. Recent progress on aberration compensation and coherent noise suppression in digital holography[J]. 2018, 8(3): 444.
 - [21] MIN J, YAO B, GAO P, et al. Wave-front curvature compensation of polarization phase-shifting digital holography[J]. [Optik](#), 2012, 123(17): 1525-1529.
 - [22] WANG G, WANG H, ZHAO J, et al. Automatic compensation for phase aberration in digital holographic microscopy[J]. SPIE, 2008, 6832: 277-285.
 - [23] MALACARA D. Optical shop testing[M]. 3th ed, New

- Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc, 2007: 498-546.
- [24] LAKSHMINARAYANAN V, FLECK A. Zernike polynomials: a guide[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(7): 545-561.
- [25] LIU F, ROBINSON B, REARDON P, et al. Analyzing optics test data on rectangular apertures using 2-D Chebyshev polynomials[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(4): 043609.
- [26] YANG Z, LIU Z, HE W, et al. Automatic high order aberrations correction for digital holographic microscopy based on orthonormal polynomials fitting over irregular shaped aperture[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(4): 045609.
- [27] FERRARO P, DE NICOLA S, FINIZIO A, et al. Compensation of the inherent wave front curvature in digital holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(11): 1938-1946.
- [28] PENSIA L, DWIVEDI G, SINGH O, ET al. Crack detection in tableware items using digital holography interferometry[C]//Digital Holography and Three-Dimensional Imaging. Washington, USA: Optica Publishing Group, 2021: DTu6H. 8.
- [29] DOBLAS A, HINCAPIE-ZULUAGA D, SAAVEDRA G, et al. Physical compensation of phase curvature in digital holographic microscopy by use of programmable liquid lens[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 5229-5233.
- [30] DOBLAS A, SÁNCHEZ-ORTIGA E, MARTÍNEZ-CORRAL M, et al. Shift-variant digital holographic microscopy: inaccuracies in quantitative phase imaging[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(8): 1352-1354.
- [31] SÁNCHEZ-ORTIGA E, DOBLAS A, SAAVEDRA G, et al. Off-axis digital holographic microscopy: practical design parameters for operating at diffraction limit[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2058-2066.
- [32] POPESCU G, IKEDA T, DASARI R R, et al. Diffraction phase microscopy for quantifying cell structure and dynamics[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(6): 775-777.
- [33] DI J, WANG K, ZHANG J, et al. Quasicommon-path digital holographic microscopy with phase aberration compensation based on a long-working distance objective[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(2): 024108.
- [34] GUO R, YAO B, GAO P, et al. Reflective point-dif fraction microscopic interferometer with long-term stability (invited paper)[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(12): 120002.
- [35] CHHANIWAL V, SINGH A S G, LEITGEB R A, et al. Quantitative phase-contrast imaging with compact digital holographic microscope employing Lloyd's mirror[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5127-5129.
- [36] MA C, LI Y, ZHANG J, et al. Lateral shearing common-path digital holographic microscopy based on a slightly trapezoid Sagnac interferometer[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13659-13667.
- [37] ZHENG C, ZHOU R, KUANG C, et al. Digital micromirror device-based common-path quantitative phase imaging[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1448-1451.
- [38] LIU Y, WANG Z, LI J, et al. Phase based method for location of the centers of side bands in spatial frequency domain in off-axis digital holographic microscopy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 86: 115-124.
- [39] LI J, WANG Z, GAO J, et al. Adaptive spatial filtering based on region growing for automatic analysis in digital holographic microscopy[J]. *Optical Engineering*, 2014, 54(3): 031103.
- [40] DU Y, FENG G, LI H, et al. Accurate carrier-removal technique based on zero padding in Fourier transform method for carrier interferogram analysis[J]. *Optik*, 2014, 125(3): 1056-1061.
- [41] 左超. 一种基于频谱亚像素平移的倾斜像差校正补偿方法: CN201811292259.2[P]. 2020-11-06.
ZUO Chao. A tilt aberration correction and compensation method based on spectral sub-pixel translation: CN2018-11292259.2[P]. 2020-11-06.
- [42] ZHANG X, SUN J, ZHANG Z, et al. Multi-step phase aberration compensation method based on optimal principal component analysis and subsampling for digital holographic microscopy[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(2): 389-397.
- [43] LAI X, XIAO S, XU C, et al. Aberration-free digital holographic phase imaging using the derivative-based principal component analysis[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2021, 26(4): 046501.
- [44] COLOMB T, CUCHE E, CHARRIÈRE F, et al. Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5): 851-863.
- [45] DI J, ZHAO J, SUN W, et al. Phase aberration compensation of digital holographic microscopy based on least squares surface fitting[J]. *Optics Communications*, 2009,

- 282(19): 3873-3877.
- [46] COLOMB T, MONTFORT F, KÜHN J, et al. Numerical parametric lens for shifting, magnification, and complete aberration compensation in digital holographic microscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(12): 3177-3190.
- [47] LIU S, LIAN Q, QING Y, et al. Automatic phase aberration compensation for digital holographic microscopy based on phase variation minimization[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1870-1873.
- [48] ÖHMAN J, SJÖDAHL M. Improved particle position accuracy from off-axis holograms using a Chebyshev model[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(1): A157-A163.
- [49] NGUYEN T, BUI V, LAM V, et al. Automatic phase aberration compensation for digital holographic microscopy based on deep learning background detection[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15043-15057.
- [50] MA S, FANG R, LUO Y, et al. Phase-aberration compensation via deep learning in digital holographic microscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(10): 105203.
- [51] XIAO W, XIN L, CAO R, et al. Sensing morphogenesis of bone cells under microfluidic shear stress by holographic microscopy and automatic aberration compensation with deep learning[J]. *Lab on a Chip*, 2021, 21(7): 1385-1394.