

多波长数字全息计量技术综述

张悦萌, 蔡萍*, 隆军, 闫浩

上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240

摘要 数字全息测量具有准确度高、非接触和全场测量等优点。单波长数字全息测量主要适用于高度变化在微米级的连续性形貌物体, 而基于双波长干涉技术的多波长数字全息技术可测量形貌更复杂、高度方向变化更陡峭的物体, 大大扩展了数字全息计量技术的应用范围。近年来, 多波长数字全息的研究发展有两个主要方向: 一是与实际需求相适应的新的测量方式和/或光路; 二是图像处理方面包括降噪、数值重建和相位畸变修正等的新技术新方法, 使计算效率和测量准确度得到明显改善。

关键词 数字全息术; 双波长技术; 形貌测量; 数字图像处理技术

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.100002

Review of Multi-Wavelength Digital Holography Metrology

Zhang Yuemeng, Cai Ping*, Long Jun, Yan Hao

School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Holding advantages including high accuracy, non-contact measurement, and full-field measurement, single-wavelength digital holographic systems are generally used for the measurement of micro-scale objects with continuous morphology. Developed from dual-wavelength interferometry techniques, multi-wavelength digital holographic systems can measure objects with complex shapes and larger scales, which extends the application range of digital holographic metrology. In recent years, there are two main research topics in multi-wavelength digital holography area. First, many types of measurement methods and/or optical setup according to realistic requirements are proposed; in addition, enhancement are achieved in image processing techniques such as noise reduction algorithm, numerical reconstruction and phase aberration compensation to improve the computational efficiency and result accuracy.

Key words digital holography; dual-wavelength technique; morphology measurement; digital image processing technology

OCIS codes 090.1995; 120.4820; 120.3940; 100.2000

1 引言

数字全息计量应用广泛, 其能够实现非接触、全场、快速和高精度的三维形貌测量, 因此被广泛应用于表面形貌测量^[1]、生物活细胞显微成像^[2]等领域。一般的数字全息测量系统多使用单波长照明的光源, 单波长数字全息主要存在以下不足: 1) 在非连续表面形貌测量中, 可测台阶高度范围限制在波长的一半, 且测量复杂形貌时效果较差; 2) 形变测量范围小; 3) 测量高粗糙表面形貌时, 效果较差^[3]。为

解决上述问题, 研究者将双波长干涉技术引入数字全息领域, 提出双波长数字全息^[4-5]。随着硬件设备, 尤其是可调谐激光器性能的提升与应用的普及, 毫米级合成波长的应用方案也被提出^[6-7]并极大地扩展了数字全息技术的应用范围。目前使用多波长技术不仅可以提升数字全息显微镜在细胞^[8]和微结构元件^[9-11]观测上的能力, 还可用于提高图像质量^[12-14]等。多波长数字全息计量技术在保留单波长数字全息计量技术优势的基础上, 测量范围可从几微米扩大至数十微米甚至到毫米级别, 同时能对高粗

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-10-09; 录用日期: 2019-10-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFF0200700)

* E-mail: pcai@sjtu.edu.cn

糙度且形貌包含台阶的物体进行精确测量,这使得数字全息计量的应用领域从微小尺度物体拓展至常规尺寸的机械零件的测量^[15-17]。最近,德国 Fraunhofer 研究所运用多波长数字全息技术对齿轮齿面进行三维测量,精度达到微米量级,还可以获得全齿廓形貌,相比于接触式齿面测量方法,其测量时间大幅缩短^[18],为工业高精度在线测量提供了新思路。

多波长数字全息的测量光路设计,可以沿用单波长数字全息光路,依次获取各波长干涉信息,但有时难以满足实际应用的需求,因此,目前多波长数字全息的研究热点之一是根据测量需求设计测量光路。此外,基于相位测量的多波长数字全息计量技术受噪声和相位误差的影响较大,因此一系列用于降低噪声和恢复真实形貌的技术被用来提高多波长数字全息的测量精度。

本文在对多波长数字全息技术的基本原理进行介绍的基础上,将介绍目前几种具有代表性的测量光路以及提高测量精度的若干关键技术,为数字全息以及形貌测量的研究者提供参考。

2 双波长干涉测量技术的基本原理

数字全息中,由于相位解算过程经过反正切计算,因此相位分布结果被限制在 $[-\pi, \pi]$ 。当被测物体轴向深度超过测量波长时,需要通过相位解包裹将包裹相位展开为真实相位。在单波长数字全息中,解包裹算法常用于处理表面光滑且连续的物体形貌相位信息,但当物体具有高纵横比结构、表面形貌含有台阶以及表面粗糙度较高时,该算法均无法准确展开相位。此外,解包裹算法较为耗时,且误差较大。

双波长技术可以解决上述问题,假设用两波长分别为 λ_1 和 λ_2 的光源对同一物体进行测量,分别得到的测量相位分布 φ_1 和 φ_2 与光程差 h 的关系为 $\varphi_1 = 2\pi h / \lambda_1$, $\varphi_2 = 2\pi h / \lambda_2$,则 h 可表示为

$$h = (\varphi_1 - \varphi_2) \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} / 2\pi = \Phi \Lambda / 2\pi, \quad (1)$$

式中: Λ 为合成波长; Φ 为合成相位。 λ_1 与 λ_2 的大小越接近,合成波长 Λ 越大。合成波长和合成相位的计算公式为

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}, \quad (2)$$

$$\Phi = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2, & \varphi_1 - \varphi_2 > 0 \\ \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi, & \varphi_1 - \varphi_2 < 0 \end{cases}. \quad (3)$$

由于单波长相位 φ 中的噪声叠加后成为合成

相位 Φ 的噪声,即 $\epsilon_\Phi \approx 2\epsilon_\varphi$,其中 ϵ_Φ 和 ϵ_φ 分别是合成相位 Φ 和单波长测量相位 φ 的噪声,根据(1)式,由 Φ 引入的形貌测量的噪声为 $\epsilon_h = \epsilon_\Phi \Lambda / 2\pi$,将比单波长形貌图噪声扩大了约 $2\Lambda / \lambda$ 倍^[5]。当合成波长 Λ 较大时,最终形貌图的噪声将远高于单波长测量的情况。

为提高测量精度,一方面需从源头降低单波长测量结果噪声,即通过合理设计光路减少环节振动和激光散斑噪声等因素的影响,获得高质量全息图;另一方面,通过包括滤波、数值重建、消除相位畸变等步骤的图像处理来提高最终结果的准确度;此外,还需要针对双波长技术导致的噪声扩大问题进行降噪处理。

3 多波长数字全息测量光路设计

在数字全息中,光路结构的设计至关重要,应根据不同的测量需求选择合适的光路设计方案。多波长数字全息是基于单波长数字全息提出的,但是测量光路结构设计以及算法流程都更为复杂,同时测量方式更加多样。目前已有多种不同类型的测量光路,根据使用的图像探测器设备,可分为使用单色相机和使用彩色相机两类方法;根据光路结构又可分为离轴全息和同轴全息;此外还可对光源进行选择。以下将对这些方法进行介绍。

3.1 单色相机离轴结构光路

离轴结构的数值重建由 Schnars 和 Jüptner^[19]提出,通过调节参考光和物光在干涉面上的传播方向呈一定夹角,使各项干涉信息在频域中分离,从而能够提取有效信息。早期实现双波长数字全息的方法与单波长离轴数字全息方法基本一致^[20-21],其使用可调谐激光器^[7, 22]或多个单波长激光器,并用分束器或光纤耦合器将多束光波合并到同一光路上,并对不同波长依次拍摄^[23-24]。这类测量方法的优点在于测量光路精简,可直接在原有的单波长离轴数字全息系统上进行改进,且后续的计算处理方法也可以直接沿用单波长测量时的处理方法。由于这种结构易于操作,目前许多算法研究的实验验证和静态测量仍会采用这种实验方案^[3]。然而分时多次拍摄不仅相对耗时,不同时刻拍摄的随机环境噪声不同,还需从外部进行调控切换光源,因此后续研究更多关注能够实现实时测量的方法。Kühn 等^[25]首次使用两个参考光臂并通过控制两束参考光传播方向来实现空间频分复用,在标准台阶实验中误差小于2%。基于同样的原理,可再增加一路参考光臂来同

时记录三波长干涉信息^[6,26]并以此类推至更多光束。

以上实时测量方法的主要缺陷在于设置了多个参考光臂,导致各参考光之间不共路,因而受机械振动影响较大,且当光源数目较多时光路结构复杂庞大。以下设计方案在实现实时测量的基础上改进参考光共路问题。例如 Turko 等^[27]使用如图 1(a)所示的光路结构使波长分别为 490 nm、534 nm 和 692 nm 的三束参考光近似共路,并测量一个 10.8 μm 台阶,其标准差为 2.5 nm。在参考光部分的光路中,首先使用二向色镜(DM1 和 DM2)使原本重叠在一起的参考光分离,然后通过反射镜(M1、M2 和 M3)调节参考光的传播方向,并用特殊针孔(PH)防止参考光混叠。

Tahara 等^[28]提出的方案如图 2(a)所示,只设

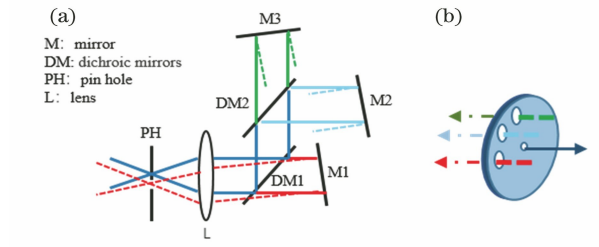
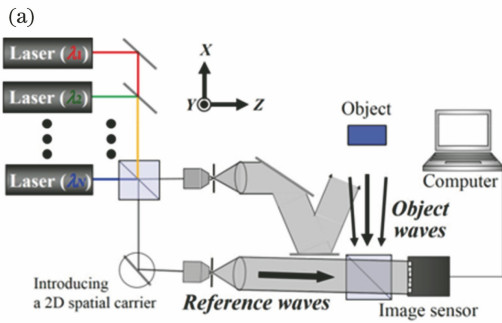


图 1 使用二向色镜实现参考光准共路方法^[27]。

(a)光路结构;(b)针孔结构

Fig. 1 Reference wave quasi common path method using dichroic mirrors^[27]. (a) Optical setup; (b) pinhole structure

置了一个参考光臂,通过反射镜调节空间载波频率使频谱分离;亦可如图 2(b)所示加上光栅,使不同参考光束分散。该方法可在波长相差较大的情况下大幅提高实时测量波长数目。

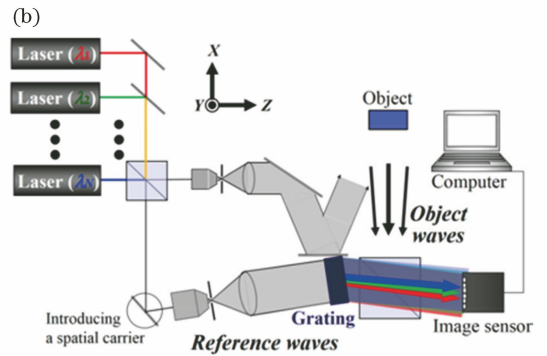


图 2 单参考光臂法的光路示意图^[28]。(a)使用镜子调节空间载波频率;(b)同时使用镜子和光栅

Fig. 2 Optical setup of single reference beam method^[28]. (a) Controlling the spatial carrier through using a mirror; (b) using a mirror and a grating

另一种改进光路结构的方法是利用光波的偏振特性,即通过控制两束参考光的偏振方向正交来保证频谱无交叠,这类方法也称为偏振复用方法。Abdelsalam 等^[29]最早提出一种偏振复用结构,该结构相比 Kühn 等^[25]的方案使用了更少的分束器使得能量损失较少,同时结构也更加紧凑;寇云莉等^[30]提出一种简易的光路结构,通过使用多个反射镜进一步减少分束镜和滤光片等光学器件的使用;Guo 等^[31]提出针对长工作距离物体实现物光与参考光近似共路的光路结构,适用于需要高时间稳定度的测量系统;此外,在透射型小物体的测量中,根据自参考法,利用回复反射器可实现参考光准共路测量^[32]等。相比于不区分偏振信息的空间频分复用方案,这类方法的光路结构更加简单,但由于偏振复用的局限,该类方法一般只能使用两个测量波长。若增加测量波长数量,则需要对光波的其他性质加

以控制,例如最近一项研究结合使用偏振复用和彩色滤光片来实现实时记录四波长全息图^[33]。

3.2 单色相机同轴结构光路

同轴结构光路的优点是光路结构简单,可充分利用图像传感器的采集能力,所得到的全息图质量高,但难点在于共轭像与零级像重叠,难以获得有效信息。其中的一种解决方法是采用相位恢复算法从一幅全息图中提取信息^[34],另一种是通过相移技术迭代消除冗余信息^[35]。为了保证测量精度,在多波长领域一般采用相移全息技术。经典的相移全息技术需连续记录多幅不同相移的全息图,除了由 Yamaguchi 等^[35]提出的四步相移法外,目前常用算法还有可实现任意步进的三步相移法和需要特殊条件的两步相移法^[36-37]。还可以采用并行相移数字全息技术^[38],通过周期性相移阵列装置使参考波不同部分具有不同相位,因此仅需记录一幅全息图便能

得到含有 N 个不同相移的干涉信息。与离轴全息不同,多波长相移全息不能直接沿用单波长相移全息的方法。相移器是通过改变光程差引起相位变化,对不同波长产生的相移是不同的。例如,当压电陶瓷(PZT)对波长为 532 nm 的光产生 90° 相移时,其对波长为 632.8 nm 的光产生的相移为 75.7° 。2004 年 Cai 等^[39]提出一种任意步进的三步相移算法,可在没有具体相移值的情况下准确解出所求信息,因此在多波长相移全息的研究中也引入了这种方法^[15]。尽管只使用三步相移法便可得到结果,但采集更多的相移图可有效降低相位图的噪声,因此部分针对多波长相移全息的研究仍会采用更高步数的相移法^[40-41]。

在对测量时间要求不高或对全息图质量要求较高的情况下,可依次对每个波长进行测量^[18, 42]。但是这种较为耗时的方法在实际测量中限制较多,且易受到环境噪声的影响,所以研究者提出同步多波长相移干涉法,即将多个波长的干涉信息同时记录到一个单色 CCD 中,并同时对所有波长产生 N 次相移,最后从全息图中分别提取并解算各波长的波前信息。这一类方法最早是 Barada 等^[41]根据多普勒效应提出的,通过将参考镜匀速移动一段距离,得到与波长大小有关的相位调制,最后通过解调分离来自不同波长的信息。这种方法只需同步拍摄八步相移干涉图即可实现 5 nm 的测量精度。Zhang 等^[43]则提出一种基于两步解调算法的方法,只需拍摄 5 帧特定的同步双波长相移图便可从中求得两个波长的信息,其精度接近多普勒方法的精度,但是测量速度远快于顺序相移法和多普勒方法。此后陆续有研究对 Zhang 的方法进行改进,如基于最小二乘迭代算法的方法^[44]和主成分分析方法^[45]均可在相移未知的情况下提取信息,前者虽然精度较高,但是迭代过程较为耗时,而后者需要消除背景信息,导致精度稍低。结合最小二乘迭代和主成分分析^[46]的方法综合了二者的优点,可在迭代次数较少时实现对背景信息的准确计算;此外,还有不需要消除背景信息的独立成分分析方法^[47]等。Servin 等^[48]对这一类方法进行理论性的分析与总结,并将该方法扩展到多波长测量。

多波长相移全息技术通过空间复用可实现实时测量。Lee 等^[49]使用如图 3(a)所示的偏振成像相机,并结合四步并行相移和空间频分复用实现实时测量,严格来说该光路属于离轴结构,但其对空间的利用率比传统离轴结构方法提高了 1.56 倍。

Safrani 等^[50]用三个单色 CCD 相机分别记录两束正交偏振光经过三个不同相移后的干涉信息,测量阶梯样品时误差率达到 1%,重复率为 20 nm,此后他们又提出首个可以测量亚纳米级精度振动的三波长系统^[51]。

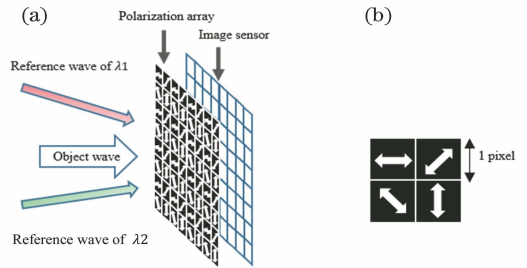


图 3 双波长实时四步并行相移干涉法^[49]。(a)概念图;
(b)极性阵列局部示意图

Fig. 3 Simultaneous dual-wavelength parallel four-step phase-shifting interferometry^[49]. (a) Schematic of the method; (b) partial schematic of polarization array

3.3 彩色相机光路

当运用多个测量波长时,光的颜色(波长大小)特性可用来区分来自不同光源的干涉信息。通过使用彩色相机可大幅提高多波长干涉测量的效率,这在其他光学测量领域中也广泛采用,例如白光干涉和彩色数字全息或 RGB 数字全息的技术等。尽管这些技术在核心问题和关键技术上与多波长数字全息计量技术不同,但在使用彩色相机的技术上可以互通和借鉴^[52]。

将彩色相机用于相移全息中,一系列同步相移的多波长干涉图由彩色图像传感器捕获,并根据颜色分离提取各波长的干涉图。除了需要额外的颜色分离步骤外,其余部分与单波长相移全息算法一致,因此计算负担较小。使用彩色相机的多波长数字全息测量光路主要分为两种:单片式彩色相机和三片式彩色相机。基于单片式相机的方法是在单个图像传感器前设置拜耳滤色阵列,使来自不同波长(颜色)的信息照射到不同的像素位置。由于每个波长对应的干涉信息均不完整,需后续算法进行插值补充,将导致横向分辨率下降了约 25%^[53]。三片式彩色相机是一种含有三个图像传感器的相机,每个传感器前各设置一个不同颜色的滤波片。通过分束器等光学元件将光分别导向三个不同位置的图像传感器,使每个传感器都记录完整的干涉信息,因此其分辨率高于单片式彩色相机法^[54]。例如赵晖等^[55]提出的基于彩色 CMOS 的双波长相移全息方法在测

量细胞的结果精度上达到了与单波长测量的一致性。

将光的颜色信息与偏振信息结合,还可以进一步实现实时测量。如图4所示,Tian等^[56]使用微偏振器阵列和拜耳滤色镜,使相机的每块像素区域记录不同的偏振态及颜色,并通过四步并行相移法解得干涉信息。该方法以LED为光源测试的VLSI标准台阶与白光干涉仪测试结果(近似为真实值)相差1.49 nm;使用激光为光源测试最大高度为10 μm 的台阶时,其测量结果与标准结果相差了0.26%。

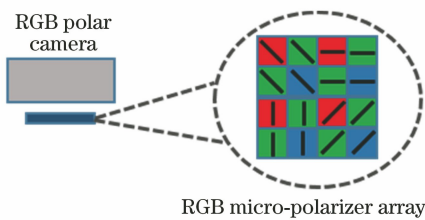


图4 彩色相机实时三波长并行相移干涉法^[56]

Fig. 4 Simultaneous three-wavelength parallel phase-shifting interferometry using color camera^[56]

彩色相机法的优势在于可同时记录并快速提取来自不同波长的干涉信息,因此被广泛应用于同轴相移全息中,也有部分研究在离轴全息光路中使用彩色相机来改善参考光共路问题^[57-58]。例如Lue等^[59]提出基于自参考法的方法,如图5所示,其中一半光束透过样本形成物光,而另一半未与样本接触的光束作为参考光,并通过彩色相机分别得到三个不同波长的测量信息。该方法可使物光和参考光近似共路,适用于透射型小物体的实时精密测量。

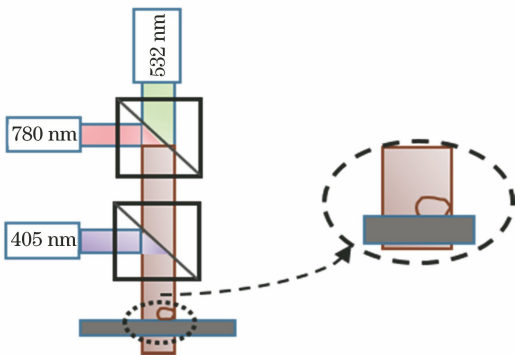


图5 彩色相机三波长自参考干涉法光路示意图^[59]

Fig. 5 Optical setup of three-wavelength self-reference interferometry using color camera^[59]

3.4 低相干光源

数字全息一般选择使用高相干度的光源如激光来避免干涉光路配置中的任何相干性问题。然而,相干光对光路中的任何缺陷高度敏感并且会产生散

斑噪声,导致所得图像质量不佳,因此选用低相干度光源可以从源头减少噪声。

对全息光学中使用非相干光源的原理研究可追溯到20世纪60年代,然而由于实验条件的限制,无法得到高质量的全息图。随着技术的发展,直到1999年Dubois等^[60]证明在数字全息技术中使用部分相干光源可以消除多次反射干扰,从而减少散斑噪声之后,该方法逐渐得到重视和发展。此后开始有研究使用低相干激光^[61]、卤素灯光源或LED光源^[62-63]作为数字全息光源。低相干光源需要复杂的设置来提高空间相干性和时间相干性,但仍难以达到激光的相干性水平,这限制了其在实际中的应用,尤其是在离轴全息中的应用。

低相干光源在多波长数字全息计量领域则具有更好的发展前景。一方面,双波长解包裹算法导致的噪声扩大问题使得对单个相位图的质量要求更高;另一方面,使用多个高精度激光光源或可调谐激光器的实验成本较高。而使用低相干光源,尤其是LED光源可同时解决上述问题。以LED作为多波长数字全息的光源经历了几个时期的发展,早期研究直接使用多个不同波长的LED光源^[62],后来有研究用单个LED光源生成多个具有不同中心波长的光来简化光路结构^[64]。目前已有大量在多波长相移全息中应用LED光源的案例。最近Cho等^[65]提出一种基于衍射光栅的光谱滤波器方法,可任意调整光的中心波长和带宽大小,带宽最小可调至3 nm,从而满足离轴全息的相干性要求。其用中心波长分别为620.7 nm和632.4 nm的两个LED光源测量高度为1.815 μm 的标准台阶样品时,标准差小于3 nm。除提高全息图像的质量外,LED光源还可用于定制和改造,以适应不同实验需求,例如可将两个LED光源封装到一个芯片中简化测量光路^[66]。

4 多波长数字全息图像处理技术及合成波长降噪技术

合理的光路结构可以保障全息图的质量,但仍需要高性能的数值重建、相位畸变修正、合成波长降噪及相位解包裹等数据处理及解算方法,才能获得高精度的测量结果,实现高效的测量。多波长数字全息图像处理技术和单波长数字全息图像处理技术有很多相同之处,但多波长的相关技术仍有其特殊之处。

4.1 自动聚焦

数字全息技术在记录离焦物体的全部信息后,通过数值重建得到物体的真实信息,其中反向传播

结果的质量与重建距离是否准确直接相关。测量形貌复杂的三维物体时,由于物体各部分处于不同聚焦面,需依赖数值扫描的方法求出各个部分的重建距离,最后将按照不同距离重建好的部分组合成扩展聚焦图。通过这种方法,无需使用多波长技术也可扩大轴向测量范围。但多波长技术提升的是动态测量范围,即在同一聚焦面上可测得的轴向范围;而扩展聚焦方法提升的是静态测量范围。

2001年, Yu等^[67]提出根据图像梯度设计的聚焦判定算法,此后单波长数字全息中发展出多种基于强度图锐度信息的自动聚焦方法。基于相位图的方法虽然更适合三维形貌的测量,但由于存在相位包裹,只有少部分针对纯相位物体或连续物体的方法。多波长数字全息计量则对自动聚焦技术有更高的要求,尤其在工业零件形貌测量等的应用中,物体形貌复杂、轴向变化较大且表面粗糙等因素导致单波长自动聚焦方法失效或效率低下。因此研究者提出针对多波长测量的改进方法, Xu等^[68]提出一种适合台阶状结构物体的测量方法,其通过计算两幅图像相邻重建距离的高度信息之差确定聚焦距离; Dohet-Eraly等^[69]提出一种快速算法,该方法的聚焦函数基于不同波长在频域的相位差,省去了傅里叶变换的过程; 2018年 Seyler等^[18]根据聚焦与离焦区域相位噪声的不同判定聚焦距离,并通过高斯拟合实现平滑的像素级自动聚焦。该方法适用于连续形貌物体的测量,且可以在有相位包裹的情况下工作,通过结合多波长技术和自动聚焦技术,其轴向测量范围可提升至毫米量级。

4.2 相位畸变修正

多波长数字全息对三维形貌测量的结果精度与相位测量的准确度直接相关,而相位畸变会严重影响相位测量的准确度。引起相位畸变的因素众多,例如离轴结构引起的倾斜、光学器件的使用和重建过程的误差会引入球面像差、散光、彗差和色差等畸变。尤其是在像面成像全息以及显微全息等使用了成像透镜的系统中,二次相位畸变往往会湮没真实相位信息,因此畸变修正是一个关键问题。

常用的去除相位畸变的数字全息方法有相位掩膜法^[70-71]、曲面拟合法^[72-73]和双曝光法^[74]三种。前两种方法是在提前知道光路信息或测试物体信息的基础上进行数值自动补偿;双曝光法在记录物体信息的全息图外再记录一幅不包含样品的参考全息图,该参考全息图包含了全部畸变信息,因此可以通过相减去除畸变。在这三种方法中,双曝光法适用

范围更广,去畸变效果最好,但需要精密的机械控制来获得参考全息图^[75]。因此一般在形貌复杂、相位变化大、表面粗糙等情况下一般采用双曝光法。2017年, Nguyen等^[76]提出一种基于CNN的相位去畸变方法,该方法无需人工干预且实际测试时计算负担较小,而去畸变效果与传统方法相当。

多波长数字全息对相位图质量的依赖性较高,因此对相位畸变修正的要求也更高,任一个波长的相位修正出现问题,都会导致结果不准确。目前大多数研究仍选择传统的相位校正方法对每一幅相位图进行修正,这不仅带来更大的计算负担,对双曝光法来说多次机械移动也会引入新的误差。因此部分研究在已知物体信息的前提下,在得到合成相位结果之后再行相位校正^[77-78]。除此以外, Khodadad等^[79]提出一种利用散斑位移自动从记录了多个频谱信息的全息图中提取校正参数的方法。

色差是多波长数字全息相位校正中存在的独有问题,它是由透镜对不同波长光的折射率不同导致聚焦点不同的问题。假如在重建时对不同波长的信息采用相同的重建距离,势必会导致其中至少一个图像离焦,使最终的合成结果不准确。Ferraro等^[80]证明,只有各个波长都重建在它们各自聚焦面时,多波长解算的结果中才不会带有相位畸变。目前大部分针对多波长数字全息的研究通过选用消色差透镜来解决色差问题,除此之外,也可通过机械调节探测器的位置(即移动CCD阵列)或成像光学系统的位移以补偿像平面的焦移。最后,在使用菲涅耳法进行数值重建时,还需要避免因波长不同导致的像素大小不同的问题。尽管用卷积法和角谱法都可以避免这个问题,但菲涅耳法更适合长距离重建,因此很多情况下仍需采用菲涅耳法^[81]。目前针对这种问题一般采用补零方法使不同波长重建的图像大小一致^[80]。

4.3 双波长降噪算法

相位图 φ 中存在随机分布的相位噪声,而双波长算法对相位的加减会使这种随机噪声叠加到结果 Φ 中,且噪声扩大与波长的放大成正比关系。因此对合成相位结果进行降噪处理是多波长数字全息计量技术的关键环节。

最早的降噪算法是由Gass等^[5]提出的用合成波长对应形貌(噪声大)指导单波长对应形貌(噪声小),这种方法可以将合成波长形貌的精度恢复至单波长测量精度。Colomb等^[82]使用这种降噪方法在合成 $300\ \mu\text{m}$ 激光的测量中获得纳米级精度,但是

这种算法只有在满足(4)式的前提下可以用 Δ_k 指导 Δ_{k+1} 展开相位,否则不能达到降噪目标^[83]。

$$\Delta_{k+1}(1 - 4\epsilon_{k+1}) \geq \Delta_k \epsilon_k, \quad (4)$$

式中: Δ_k 是较大的合成波长; Δ_{k+1} 是其次级合成波长或测量波长; ϵ_k 和 ϵ_{k+1} 是对应的噪声。这种关系限制了可合成波长的范围,为此一些研究提出合成大波长激光时增加额外测量波长的逐步迭代降噪方法^[6, 62, 84]。这类方法通过对被测物轴向深度的估计设计出最大合成波长 Δ_1 ,同时根据实际条件选择测量波长 λ_0 ,并根据(4)式的限制条件合理选择其他测量波长。

在合成大波长激光时,增加额外测量波长的方法的测量精度仍保持在单波长测量精度水平,但会使得实验设置和数据处理较为麻烦,因此许多研究尝试不使用额外的测量波长算法。基于线性回归的方法不采用(3)式算法,而是通过两个相位图之间的线性关系展开相位,从而避免相位图相减引起的噪声扩大^[8],但这种基于近似关系的算法在噪声较大时仍会失败。此前有研究表明,双波长技术不仅可以合成大波长以扩大测量范围,也可以反向操作合成更小的波长,使得测量精度更高,因此有研究使用短合成波长方法结合 Gauss 降噪方法^[42]或线性回归方法^[85]在保持较大测量范围的同时降低噪声。2018年,Guo等^[3]提出一种基于总变差正则化的降噪方法,并证明在测量标准台阶样品的结果上远优于 Gauss 降噪方法。

4.4 深度学习在数字全息中的应用

深度学习技术被广泛用于数字图像的分析处理,在很多领域其性能接近甚至超越传统算法。近年来,深度学习也被引入到数字全息领域,这为数字全息的发展提供了新方法。除了应用在如 4.2 节所述的相位畸变处理中,在数字全息图像处理的其他环节也都有相应的研究,主要集中在数值重建和相位解包裹两方面。

数值重建过程由相位恢复和反向传播两部分组成。相位恢复是从混叠的共轭像和零级像中提取有效信息,其中基于离轴结构光路的方法较为简单,而采用同轴光路则需要额外拍摄或使用特定的相位恢复算法,但不论是精度还是计算时间都难以满足现实需求。2018年,Rivenson等^[86]使用 CNN 实现从一幅已知重建距离的同轴全息图中提取有效信息,该实验对透明生物物体进行测试,计算时间显著减少。

反向传播过程中的一个关键参数是重建距离,

传统自动聚焦算法的主要缺点在于其基于数值遍历的方法使得计算负担大且耗时。而基于深度学习的自动聚焦技术可以在不需要进行传播的情况下直接得到聚焦结果。此外,反向传播计算过程涉及到其他参数包括波长、相机像素等,而这些参数在某些情况下无法确定或设定值与实际值有误差。因此 Ren等^[87]提出用 CNN 在未知参数情况下完成自动聚焦的方法,并通过实验证明该方法对强度物体和纯相位物体的测试结果优于传统方法,且计算时间仅需约 0.2 s。

以上方法均将数值重建的两个过程拆分进行,2018年 Wang等^[88]通过深度学习实现从一张全息图一步完成数值重建的两个过程。其快速计算的能力使实时测量深度较大的三维物体成为可能,极大地提升了数字全息的应用能力。

另一个研究重点是相位解包裹技术,如第 2 节所述,传统的相位解包裹方法不能处理带有台阶的复杂形貌物体且运算时间较长。深度学习方法通过仿真各类形貌的物体对神经网络进行训练,目前常用的方法包括相位边界线检测法^[89]、语义分割法^[90]和同时结合降噪处理和分割的方法^[91]等。以上方法均证明在处理带噪声相位图时,深度学习方法在运行时间和准确率上都超过传统解包裹算法。2019年,Wang等^[92]提出一种生成仿真数据的方法,并得到包含 37500 组相位数据的数据集,其数据量远超其他研究所用的数据数量。他们证明深度学习方法不仅在抗噪性能上超过传统方法,在抗混叠性上表现也更好。

近年来,针对数字全息图像处理技术的研究始终朝着精度更高,计算速度更快的方向发展,为区别于传统算法的深度学习技术提供了更多可能性。可以预见未来将有更多相关研究涉足这一领域,更好地促进了数字全息技术的发展。

5 总 结

多波长技术可提高数字全息计量的能力,被广泛应用于三维形貌测量领域。由于应用范围的不断拓展,近年来针对不同测量需求设计出多种类型且具有不同特点的测量光路。从波长选择角度来看,使用单色相机的方法限制较少,而使用彩色相机时要求测量波长处于特殊波段;从实时性和设备成本角度来看,单色相机离轴全息更有优势;而从图像质量来看,单色相机顺序相移方法和使用三芯彩色 CCD 方法的质量最高;此外,对不同性质(如透明或

反射等)的测量物体,其最佳测量光路也不同。

双波长算法中出现噪声扩大的问题,为使噪声水平达到测量精度,一方面要使单波长测量相位图精度足够高,在测量光路确定后主要与图像处理环节相关;另一方面,需要从算法上使合成相位噪声降低至单波长相位噪声大小。在多波长数字全息中,目前的研究大多直接沿用基于单波长数字全息的处理方法,这使得对图像的处理更加复杂且低效。尤其是在相位畸变处理中选择双曝光法的情况,使用多个波长测量需要记录更多的参考全息图,这给实际应用带来不便。噪声扩大是多波长数字全息计量中独有的问题,目前最新的研究算法能使合成大波长时的噪声水平恢复到单波长测量时的噪声水平,但仍要求单波长相位噪声不能过大。最后,采用多波长数字全息技术对大物体(毫米级)的测量是一个较新的研究方向,但合成大波长时的合成波长校正以及噪声处理的相关研究仍然较少。近年来新兴的深度学习技术极大地拓展了图像处理技术的能力,虽然目前仍没有针对多波长领域的研究,但可以预计这种技术在未来可以解决多波长图像处理技术中的问题。

总之,多波长数字全息在计量领域已经取得了重要的发展并应用于实际中,但在提高测量准确度的技术上仍有很大提升空间。

参 考 文 献

- [1] Cuche E, Bevilacqua F, Depeursinge C. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(5): 291-293.
- [2] Marquet P, Rappaz B, Magistretti P J, et al. Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(5): 468-470.
- [3] Guo R L, Zhang W G, Liu R, et al. Phase unwrapping in dual-wavelength digital holographic microscopy with total variation regularization [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3449-3452.
- [4] Forrester A T, Parkins W E, Gerjuoy E. On the possibility of observing beat frequencies between lines in the visible spectrum[J]. *Physical Review*, 1947, 72(8): 728.
- [5] Gass J, Dakoff A, Kim M K. Phase imaging without 2π ambiguity by multiwavelength digital holography [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(13): 1141-1143.
- [6] Mann C J, Bingham P R, Paquit V C, et al.

- Quantitative phase imaging by three-wavelength digital holography [J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9753-9764.
- [7] Wada A, Kato M, Ishii Y. Large step-height measurements using multiple-wavelength holographic interferometry with tunable laser diodes [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(12): 3013-3020.
- [8] Khmaladze A, Matz R L, Zhang C, et al. Dual-wavelength linear regression phase unwrapping in three-dimensional microscopic images of cancer cells [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 912-914.
- [9] Li Y, Xiao W, Pan F. Multiple-wavelength-scanning-based phase unwrapping method for digital holographic microscopy [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(5): 979-987.
- [10] Zhang T, Unger K, Maire G, et al. Multi-wavelength multi-angle reflection tomography [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26093-26105.
- [11] Hosseini P, Jin D, Yaqoob Z, et al. Single-shot dual-wavelength interferometric microscopy [J]. *Methods*, 2018, 136: 35-39.
- [12] Pan F, Yang L Z, Xiao W. Coherent noise reduction in digital holographic microscopy by averaging multiple holograms recorded with a multimode laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21815-21825.
- [13] Nomura T, Okamura M, Nitanaï E, et al. Image quality improvement of digital holography by superposition of reconstructed images obtained by multiple wavelengths [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(19): 38-43.
- [14] Di J L, Qu W J, Wu B J, et al. Dual wavelength digital holography for improving the measurement accuracy [C]. *International Conference on Optics in Precision Engineering & Nanotechnology*, 2013.
- [15] Carl D, Fratz M, Pfeifer M, et al. Multiwavelength digital holography with autocalibration of phase shifts and artificial wavelengths [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(34): H1-H8.
- [16] Fratz M, Carl D. Novel industry ready sensors for shape measurement based on multi wavelength digital holography [M] // *Fringe 2013*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 479-484.
- [17] Schiller A, Beckmann T, Fratz M, et al. Digital holography on moving objects: multiwavelength height measurements on inclined surfaces [C]. *Society of Photo-optical Instrumentation Engineers*, 2017.

- [18] Seyler T, Fratz M, Beckmann T, et al. Extending the depth of field beyond geometrical imaging limitations using phase noise as a focus measure in multiwavelength digital holography [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(7): 1042.
- [19] Schnars U, Jüptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(2): 179-181.
- [20] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(1): 156-160.
- [21] 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.
- [22] Wada A, Kato M, Ishii Y. Multiple-wavelength digital holographic interferometry using tunable laser diodes [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(12): 2053-2060.
- [23] Colomb T, Krivec S, Hutter H, et al. Digital holographic reflectometry [J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3719-3731.
- [24] Di J L, Zhang J W, Xi T L, et al. Improvement of measurement accuracy in digital holographic microscopy by using dual-wavelength technique [J]. *Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2015, 14(4): 041313.
- [25] Kühn J, Colomb T, Montfort F, et al. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition [J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7231-7242.
- [26] Tahara T, Gotohda T, Akamatsu T, et al. High-speed image-reconstruction algorithm for a spatially multiplexed image and application to digital holography [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2937-2940.
- [27] Turko N A, Eravuchira P J, Barnea I, et al. Simultaneous three-wavelength unwrapping using external digital holographic multiplexing module [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1943-1946.
- [28] Tahara T, Kaku T, Arai Y. Digital holography based on multiwavelength spatial-bandwidth-extended capturing-technique using a reference arm (Multi-SPECTRA) [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29594-29610.
- [29] Abdelsalam D G, Magnusson R, Kim D. Single-shot, dual-wavelength digital holography based on polarizing separation [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(19): 3360-3368.
- [30] Kou Y L, Li E P, Di J L, et al. Surface morphology measurement of tiny object based on dual-wavelength digital holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209010.
寇云莉, 李恩普, 邸江磊, 等. 利用双波长数字全息术测量微小物体表面形貌 [J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209010.
- [31] Guo R L, Wang F. Compact and stable real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a long-working distance objective [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 24512-24520.
- [32] Liu L, Shan M G, Zhong Z, et al. Simultaneous dual-wavelength off-axis flipping digital holography [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4331-4334.
- [33] Tayebi B, Han J H, Sharif F, et al. Compact single-shot four-wavelength quantitative phase microscopy with polarization- and frequency-division demultiplexing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20172-20182.
- [34] Liu G, Scott P D. Phase retrieval and twin-image elimination for in-line Fresnel holograms [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(1): 159-165.
- [35] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(16): 1268-1270.
- [36] Meng X F, Cai L Z, Xu X F, et al. Two-step phase-shifting interferometry and its application in image encryption [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1414-1416.
- [37] Shaked N T, Zhu Y Z, 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.
- [38] Awatsuji Y, Sasada M, Kubota T. Parallel quasi-phase-shifting digital holography [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(6): 1069-1071.
- [39] Cai L Z, Liu Q, Yang X L. Generalized phase-shifting interferometry with arbitrary unknown phase steps for diffraction objects [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(2): 183-185.
- [40] Abdelsalam D G, Kim D. Two-wavelength in-line phase-shifting interferometry based on polarizing separation for accurate surface profiling [J]. *Applied*

- Optics, 2011, 50(33): 6153-6161.
- [41] Barada D, Kiire T, Sugisaka J I, et al. Simultaneous two-wavelength Doppler phase-shifting digital holography [J]. Applied Optics, 2011, 50 (34): H237-H244.
- [42] Xiong J X, Zhong L Y, Liu S D, et al. Improved phase retrieval method of dual-wavelength interferometry based on a shorter synthetic-wavelength [J]. Optics Express, 2017, 25(7): 7181-7191.
- [43] Zhang W P, Lu X X, Fei L H, et al. Simultaneous phase-shifting dual-wavelength interferometry based on two-step demodulation algorithm [J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5375-5378.
- [44] Fei L H, Lu X X, Wang H L, et al. Single-wavelength phase retrieval method from simultaneous multi-wavelength in-line phase-shifting interferograms [J]. Optics Express, 2014, 22(25): 30910-30923.
- [45] Zhang W P, Lu X X, Luo C S, et al. Principal component analysis based simultaneous dual-wavelength phase-shifting interferometry [J]. Optics Communications, 2015, 341: 276-283.
- [46] Qiu X, Zhong L Y, Xiong J X, et al. Phase retrieval based on temporal and spatial hybrid matching in simultaneous phase-shifting dual-wavelength interferometry [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 12776-12787.
- [47] Li J S, Lu X X, Xu X F, et al. Simultaneous phase-shifting dual-wavelength interferometry based on independent component analysis [J]. Applied Optics, 2017, 56(13): 3673-3678.
- [48] Servin M, Padilla M, Garnica G. Synthesis of multi-wavelength temporal phase-shifting algorithms optimized for high signal-to-noise ratio and high detuning robustness using the frequency transfer function [J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9766-9780.
- [49] Lee Y, Ito Y, Tahara T, et al. Single-shot dual-wavelength phase unwrapping in parallel phase-shifting digital holography [J]. Optics Letters, 2014, 39(8): 2374-2377.
- [50] Safrani A, Abdulhalim I. High-speed 3D imaging using two-wavelength parallel-phase-shift interferometry [J]. Optics Letters, 2015, 40(20): 4651-4654.
- [51] Ney M, Safrani A, Abdulhalim I. Three wavelengths parallel phase-shift interferometry for real-time focus tracking and vibration measurement [J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 719-722.
- [52] Kumar U P, Mohan N K, Kothiyal M P. Red-green-blue wavelength interferometry and TV holography for surface metrology [J]. Journal of Optics, 2011, 40(4): 176-183.
- [53] Desse J M, Picart P, Tankam P. Sensor influence in digital 3λ holographic interferometry [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(6): 064005.
- [54] Pfortner A, Schwider J. Red-green-blue interferometer for the metrology of discontinuous structures [J]. Applied Optics, 2003, 42(4): 667-673.
- [55] Zhao H, Zeng F C, Zhong L Y, et al. Quantitative measurement of cell phase using dual-wavelength digital holographic microscopy with color CMOS [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070901.
- 赵晖, 曾凡创, 钟丽云, 等. 基于彩色 CMOS 双波长数字全息显微术的细胞相位定量测量 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070901.
- [56] Tian X B, Tu X Z, Zhang J C, et al. Snapshot multi-wavelength interference microscope [J]. Optics Express, 2018, 26(14): 18279-18291.
- [57] Rinehart M T, Shaked N T, Jenness N J, et al. Simultaneous two-wavelength transmission quantitative phase microscopy with a color camera [J]. Optics Letters, 2010, 35(15): 2612-2614.
- [58] Min J W, Yao B L, Gao P, et al. Dual-wavelength slightly off-axis digital holographic microscopy [J]. Applied Optics, 2012, 51(2): 191-196.
- [59] Lue N, Kang J W, Hillman T R, et al. Single-shot quantitative dispersion phase microscopy [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(8): 084101.
- [60] Dubois F, Joannes L, Legros J C. Improved three-dimensional imaging with a digital holography microscope with a source of partial spatial coherence [J]. Applied Optics, 1999, 38(34): 7085-7094.
- [61] Pedrini G, Schedin S. Short coherence digital holography for 3D microscopy [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2001, 112(9): 427-432.
- [62] Warnasooriya N, Kim M K. LED-based multi-wavelength phase imaging interference microscopy [J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9239-9247.
- [63] Kemper B, Stürwald S, Remmersmann C, et al. Characterisation of light emitting diodes (LEDs) for

- application in digital holographic microscopy for inspection of micro and nanostructured surfaces[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(7): 499-507.
- [64] Jeon S, Cho J, Jin J N, et al. Dual-wavelength digital holography with a single low-coherence light source [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18408-18416.
- [65] Cho J, Lim J, Jeon S, et al. Dual-wavelength off-axis digital holography using a single light-emitting diode[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 2123-2131.
- [66] Deng L J, Huang X Y, Zeng L M, et al. Dual-wavelength image-plane digital holographic microscopy based on bi-color LED chips [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0111004.
邓丽军, 黄星艳, 曾吕明, 等. 基于双色LED芯片的双波长像面数字全息显微术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0111004.
- [67] Yu L F, Cai L L. Iterative algorithm with a constraint condition for numerical reconstruction of a three-dimensional object from its hologram [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(5): 1033-1045.
- [68] Xu L, Mater M, Ni J. Focus detection criterion for refocusing in multi-wavelength digital holography[J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 14779-14793.
- [69] Dohet-Eraly J, Yourassowsky C, Dubois F. Fast numerical autofocus of multispectral complex fields in digital holographic microscopy with a criterion based on the phase in the Fourier domain [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4071-4074.
- [70] Cuhe E, Marquet P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(34): 6994-7001.
- [71] Colomb T, Kühn J, Charrière F, et al. Total aberrations compensation in digital holographic microscopy with a reference conjugated hologram[J]. *Optics Express*, 2006, 14(10): 4300-4306.
- [72] Colomb T, Cuhe 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.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] Stępień P, Korbuszewski D, Kujawińska M. Digital holographic microscopy with extended field of view using tool for generic image stitching [J]. *ETRI Journal*, 2019, 41(1): 73-83.
- [76] 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.
- [77] Upputuri P K. Measurement of discontinuous surfaces using multiple-wavelength interferometry[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(7): 073603.
- [78] Nguyen T, Nehmetallah G, Raub C, et al. Accurate quantitative phase digital holographic microscopy with single- and multiple-wavelength telecentric and nontelecentric configurations [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(21): 5666-5683.
- [79] Khodadad D, Bergström P, Hällstig E, et al. Fast and robust automatic calibration for single-shot dual-wavelength digital holography based on speckle displacements [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 5003-5010.
- [80] Ferraro P, Grilli S, Miccio L, et al. Full color 3-D imaging by digital holography and removal of chromatic aberrations [J]. *Journal of Display Technology*, 2008, 4(1): 97-100.
- [81] Alfieri D, Coppola G, de Nicola S, et al. Method for superposing reconstructed images from digital holograms of the same object recorded at different distance and wavelength [J]. *Optics Communications*, 2006, 260(1): 113-116.
- [82] Colomb T, Kühn J, Depeursinge C, et al. Several micron-range measurements with sub-nanometric resolution by the use of dual-wavelength digital holography and vertical scanning [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7389: 73891H.
- [83] Nadeborn W, Andrä P, Osten W. A robust procedure for absolute phase measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1996, 24(2/3): 245-260.
- [84] Parshall D, Kim M K. Digital holographic microscopy with dual-wavelength phase unwrapping

- [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(3): 451-459.
- [85] Shan M G, Liu L, Zhong Z, et al. Improved phase reconstruction using linear programming for dual-wavelength digital holography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 117: 1-6.
- [86] Rivenson Y, Zhang Y B, Günaydin H, et al. Phase recovery and holographic image reconstruction using deep learning in neural networks [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(2): 17141.
- [87] Ren Z B, Xu Z M, Lam E Y. Learning-based nonparametric autofocusing for digital holography [J]. *Optica*, 2018, 5(4): 337-344.
- [88] Wang H, Lyu M, Situ G H. eHoloNet: a learning-based end-to-end approach for in-line digital holographic reconstruction [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 22603-22614.
- [89] Sawaf F, Groves R M. Phase discontinuity predictions using a machine-learning trained kernel [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5439-5447.
- [90] Spoorthi G E, Gorthi S, Gorthi R K S S. PhaseNet: a deep convolutional neural network for two-dimensional phase unwrapping [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, 26(1): 54-58.
- [91] Zhang J C, Tian X B, Shao J B, et al. Phase unwrapping in optical metrology via denoised and convolutional segmentation networks [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14903-14912.
- [92] Wang K Q, Li Y, Qian K M, et al. One-step robust deep learning phase unwrapping[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10):15100-15115.