

文章编号: 1005-5630(2023)01-0087-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.001.013

# 光学干涉图像区域分割技术研究进展

郎吉伟<sup>1</sup>, 白福忠<sup>1</sup>, 王建新<sup>2</sup>, 顾乃庭<sup>3</sup>

(1. 内蒙古工业大学 机械工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 西南科技大学 理学院, 四川 绵阳 621010;

3. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要:** 干涉图像区域分割属于重要的干涉图像预处理步骤, 目的是从干涉图像中提取出有效数据区域。干涉图像区域分割广泛存在于各种数字波面干涉仪的实验测试和数据处理中, 对于精确波前复原以及相位解包裹可靠实施具有重要影响。介绍了3类常见干涉图像的区域分割技术, 包括单帧干涉图、同步移相干涉图和横向剪切干涉图, 并系统总结了相关研究进展、展望了该领域研究趋势。

**关键词:** 干涉仪; 区域分割; 同步移相干涉图像; 横向剪切干涉图像

**中图分类号:** TH 741;O 436.1 **文献标志码:** A

## Progress on region segmentation techniques for optical interferogram

LANG Jiwei<sup>1</sup>, BAI Fuzhong<sup>1</sup>, WANG Jianxin<sup>2</sup>, GU Naiting<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, 010051, China;

2. School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010, China;

3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, 610209, China)

**Abstract:** The region segmentation is an important pre-processing step in optical interferogram processing, in which the effective region is extracted from interferogram. The region segmentation of interferogram widely exists in the experimental testing and data processing of various digital wavefront interferometers. It has important influence on accurate wavefront retrieval and reliable implementation of phase unwrapping. The paper introduces the region segmentation technology of three kinds of popular interferogram, including single-frame interferogram, simultaneous phase-shifting interferogram and lateral shearing interferogram. The related research progress is systematically summarized, and the research trend in this field is also prospected.

**Keywords:** interferometry; region segmentation; simultaneous phase-shifting interferogram;

收稿日期: 2022-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(51765054, 62165011); 内蒙古自治区自然科学基金(2020LH06002); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0263)

第一作者: 郎吉伟(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光学图像处理。E-mail: 2402142910@qq.com

通信作者: 白福忠(1979—), 男, 教授, 研究方向为光学测量、图像处理。E-mail: fzbaiim@163.com

lateral shearing interferogram

## 引 言

干涉测量技术具有全场测试、高精度和非接触测量<sup>[1]</sup>等优点。多种类型的波面测量干涉仪已被应用于厚度测量<sup>[2]</sup>、三维形貌测量<sup>[3]</sup>、温度场测量<sup>[4]</sup>、折射率测量<sup>[5]</sup>、光束质量评价<sup>[6]</sup>、医疗诊断<sup>[7-8]</sup>等各种领域。干涉仪通过将被测物理量转化为光学相位并引起干涉图强度发生变化,然后引入相位调制技术,从干涉图复原波前相位进而获得待测参数。

对于各类波面测量干涉仪来说,干涉图像预处理是实验数据处理中的普遍和共性问题。对于不同类型干涉仪输出的干涉图而言,其预处理的目的尽管存在差别,但是同样是必要和关键的。由 CCD 相机采集到的干涉图像包含干涉数据区域和背景区域两部分,而待测信息仅包含在干涉数据区域,背景区域选择过大将会影响处理速度。此外,由干涉图计算波前相位时需要根据干涉区域来确定有效数据区域;常用的解包裹算法需事先已知孔径轮廓,而干涉区域轮廓提取结果的准确性和规则程度也对相位解包裹的可靠实施有着重要影响<sup>[9]</sup>,大多解包裹算法受背景区域数据影响将出现解调错误<sup>[10]</sup>,导致最终的测量结果产生误差。

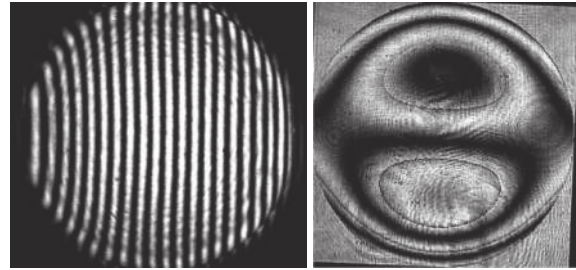
对于动态干涉仪而言,一般由一个 CCD 相机同步采集多个移相干涉图或者由多个 CCD 相机同步采集多帧移相干涉图<sup>[11-13]</sup>,不论哪种情况,在使用移相算法进行相位复原时均需首先提取干涉图有效区域,进而对各通道干涉图进行位置配准,不准确的区域分割会产生位置配准误差,进一步转化为相移误差,从而引起复原误差<sup>[14]</sup>。对于剪切干涉仪而言,准确可靠的干涉图区域分割结果还会为剪切比计算、精确波前重构提供基础保障。

基于此,干涉图像区域分割对于各种类型波面测量干涉仪的波前相位精确复原、相位解包裹可靠实施均具有重要意义,同时还可以改善干涉仪实验测试效率,提高数据处理速度。从 3 类代表性干涉图像预处理出发,介绍干涉图像区域分

割技术研究进展。

## 1 单帧干涉图像区域分割

常见的普通双光束干涉仪有马赫曾德尔干涉仪、泰曼格林干涉仪和斐索干涉仪等,某一时刻获取到的单帧载波干涉图和时间移相干涉图如图 1 所示,这也是干涉测量中经常遇到的两种干涉图类型。分别利用傅里叶变换法<sup>[15-16]</sup>和移相算法<sup>[17]</sup>即可从干涉图中解算出包裹相位,进而完成相位解包裹操作得到被测相位。



(a) 载波干涉图

(b) 时间移相干涉图

图 1 单帧干涉图

Fig. 1 Single frame of interferogram

针对上述单帧干涉图(主要包括载波干涉图和时间移相干涉图)的区域分割,除了手动选取干涉区域轮廓这一方式外,一些学者也提出了计算机自动处理方法。勾鑫聪等<sup>[18]</sup>通过对干涉图进行高斯滤波、边缘检测、二值化处理,再对平滑干涉区域进行形态学处理,提取出干涉区域轮廓。吕绪浩<sup>[19]</sup>提出基于人工模板的干涉区域提取方法,并对干涉图进行空间平滑来保证相位场的连续性。刘廷瑞等<sup>[20]</sup>研究了一种针对单帧干涉图的自动处理方法,对干涉图像进行空间平滑,然后使用  $5 \times 5$  圆形结构元素对图像进行开运算估计出背景亮度,将背景图像从原图像中减去,进而利用阈值处理算法提取干涉区域。此外也有学者利用条纹对比度测量来提取干涉区域<sup>[21]</sup>,这种方法可靠性差,另外还需手工操作来辅助完成。

下面介绍两种基于图像处理技术的单帧干涉图像区域分割技术。

### 1.1 基于形态学原理的区域分割技术

葛锦蔓等<sup>[22]</sup>应用干涉技术测量薄膜厚度时指出, 精确获得薄膜厚度信息的基础和关键是提取干涉图像区域。其算法流程如图 2 所示: 首先采用 Otsu 算法对干涉图像进行阈值分割转化为二值图像; 然后利用 5×5 圆形结构元素对图像进行膨胀和腐蚀; 再采用 Canny 算子提取图像

边缘, 得到干涉区域轮廓; 由于采集的干涉条纹的外缘通常会出现条纹变形, 使用最小二乘法对轮廓进行圆拟合后, 再人为地将干涉区域缩小几像素以消除条纹边缘变形的影响。该方法仅可用于载波干涉条纹图像, 此外, 图 2 中得到的结果是通过人为地缩小几像素后提取的, 而缩小多大尺寸并无理论依据, 从而造成提取精度变差。

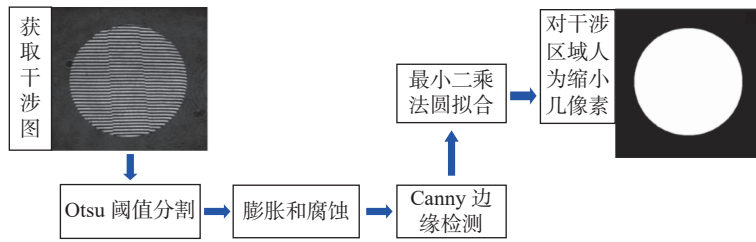


图 2 基于形态学原理的干涉图像区域分割流程

Fig. 2 The process of interferogram region segmentation based on morphology principle

### 1.2 基于二阶梯度熵判定函数的区域分割技术

吴双乐等<sup>[23]</sup>提出了一种基于二阶梯度熵的数学处理方法对散斑干涉图像进行预处理, 处理步骤如图 3 所示。首先采用二阶 Laplacian 梯度

算子处理干涉图像, 处理结果中背景区域灰度分布在 0~80 与 230~255 范围内, 而干涉区域灰度大约位于 0~10 范围内, 干涉区域较背景区域的灰度分布范围更少, 因而可根据这种分布差异实现干涉图像区域分割。

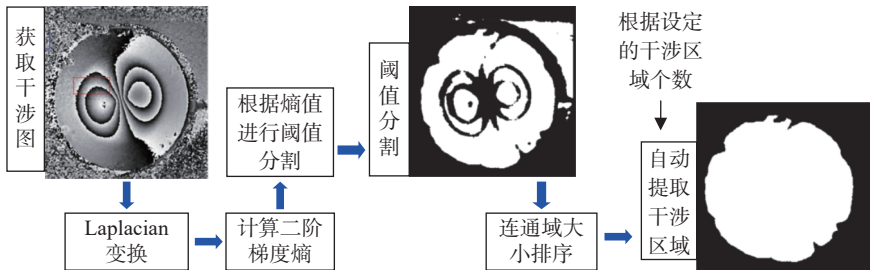


图 3 基于二阶梯度熵的干涉图像区域分割流程

Fig. 3 The process of interferogram region segmentation based on the second-order gradient entropy

作者采用信息熵量化评价这种灰度分布差异。为了能够在背景区域信息未知情况下提取干涉区域, 将图像分成大小为  $M \times M$  的若干子区, 计算各子区内二阶灰度梯度值的熵值。由于二阶梯度灰度分布不同, 干涉区域的熵值会远小于背景区域; 接下来通过手动选取阈值对信息熵进行二分类, 以此实现干涉图像的阈值分割。如图 3 所示阈值分割结果并不理想, 为进一步去除背景区域, 将阈值分割结果的连通区域按面积大小进行排序, 进而提取出干涉区域。

该方法较好地提高了散斑干涉技术的检测精度与数据处理速度, 但是需要手动选取阈值, 且阈值大小直接影响提取结果。此外干涉区域轮廓并不规则, 主要与子区尺寸或者子区划分这一过程有关, 而不准确的轮廓检测结果会直接导致相位解包裹不能正确实施。

该方法较好地提高了散斑干涉技术的检测精

对比分析以上两种区域分割技术发现: (1) 两种方法都只能处理特定的某一类干涉图像, 技术通用性差; (2) 两种方法都需对分割结果进行人为调整以获得较为规则的轮廓, 自动化程度低, 并且对轮廓进行人为调整并没有科学依据, 同样会降低区域分割精度。

目前针对单帧干涉图像处理的研究工作更多集中在条纹分析以及相位求解算法等领域，而针对单帧干涉图像区域分割的专门化文献报道相对较少，成熟且有效的技术理论相对缺乏。上述基于图像处理的干涉区域分析方法属于半自动化技术，需人工辅助才能实施。基于此，研究一种通用性好、自动化程度高的单帧干涉图像区域分割方法仍有很大的研究空间。

## 2 多通道同步移相干涉图像区域分割与位置配准

同步移相干涉仪通过在同一时刻采集不同空间位置上产生的多帧移相干涉图，利用移相算法复原相位，有效地避免了振动、空气扰动等时变误差因素的影响，实现被测相位的实时测量。大多数动态干涉仪均采用空间分光加偏振移相方案，借助分光元件将光束分成多路，然后在每一通道引入不同相移而实现同步移相。同步移相干涉图不论是由一个还是多个 CCD 相机获得，在进行相位复原时均需事先完成各通道干涉图区域分割以及精确的位置配准，不准确的区域分割或

位置配准误差都将转化为相移误差，从而引起相位复原误差。

一种确定同步移相干涉图相对位置的方法是在光路中加入标志点<sup>[24-25]</sup>、标定板<sup>[26]</sup>、目标物<sup>[27]</sup>，分光后各通道图像中均包含该目标图像，然后采用目标检测技术或相关运算计算光斑轮廓中心、光斑区域重心或标志点坐标来确定各通道干涉图之间的相对位置<sup>[28-29]</sup>。上述方法无法准确得到各通道干涉图像的确切位置及干涉区域轮廓，目标或标志点提取精度影响位置配准精度，配准结果重复性较差。以下介绍两种典型的同步移相干涉图位置配准方法。

### 2.1 基于统计分析原理的位置配准

课题组<sup>[30]</sup>建立偏振分光与偏振移相的自参考点衍射同步移相干涉仪，并由一个 CCD 相机同步获得一帧四通道同步移相干涉图，经区域分割、位置配准后利用四步移相算法可实时重建波前相位。由于各通道移相干涉图之间存在特定相移量，常规图像处理技术难以准确提取干涉区域，为此引入一种序列干涉图像的统计分析方法实现位置配准，基本流程如图 4 所示。

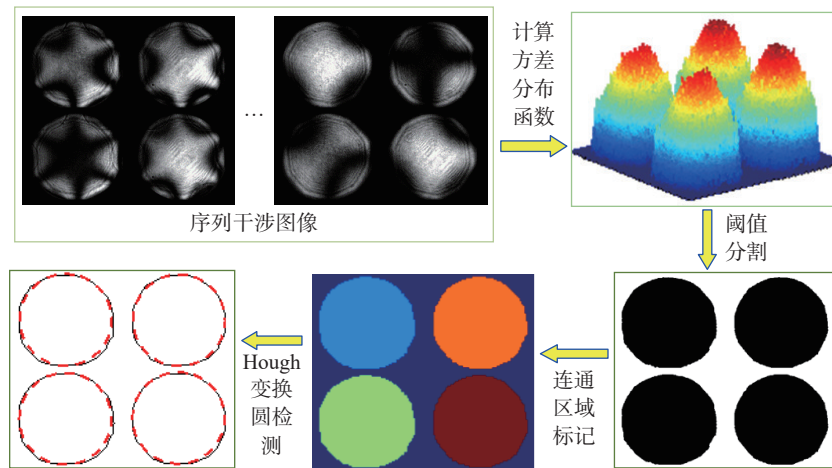


图 4 基于序列同步移相干涉图统计分析的位置配准流程

Fig. 4 Position registration process based on statistical analysis of sequential phase-shifting interferograms

通过在同步移相干涉仪中随机引入不同的波前相位，同时采集若干帧序列同步移相干涉图。计算所有干涉图像在每一对应位置处的光强方差，遍历全部像素后得到二维方差分布函数；由于干涉图背景区域内各像素的灰度值在多帧图像

之间变化很小，而干涉区域内这种变化则很大，因此借助方差分析可以描述这种变化特征，进而采用最大组间方差法分割干涉图像的背景与干涉区域。对干涉区域进行连通区域标记，并使用 Hough 变换圆检测计算出 4 个干涉区域轮廓的圆



心坐标和半径参数, 从而实现各通道移相干涉图之间的位置配准。

### 2.2 基于相位相关算法的同步移相干涉图位置配准

郑东晖等<sup>[31]</sup>建立基于光栅分光加延迟阵列移相的动态干涉仪系统, 针对测试光斑图像利用相位相关算法间接获得四通道移相干涉图之间的相对位置关系, 进而校正位置配准误差, 其处理流程如图 5 所示。实验图像采集时需首先获取同步移相干涉图, 然后旋转干涉仪系统中的半波片使参考光消光, 从而获得 4 个测试光斑。将其中一个光斑确定为基准光斑, 采用相位相关算法分别计算其他 3 个测试光斑相对基准光斑之间

的平移量。相位相关算法事实上是一种频域互相关算法, 其基本理论依据是基于二维图像傅里叶变换的平移特性, 即空域中的位移相当于频域的相移。相位相关算法的具体步骤为: 首先分离出 4 个光斑, 将它们作为 4 幅独立图像; 对基准光斑图像和其中 1 个测试光斑图像分别进行傅里叶变换; 计算二者的归一化功率谱后进行傅里叶逆变换; 求出峰值点的坐标便得到了两个光斑之间的平移量; 同理求解其他两个光斑图像与基准光斑图像的位置关系。Kiire 等<sup>[32]</sup>通过调整光路获取极低对比度的干涉图像, 使四通道干涉图之间具有相似的灰度分布, 进而采用空域互相关运算实现位置配准, 其方法原理与实现过程与上述算法<sup>[31]</sup>类似。

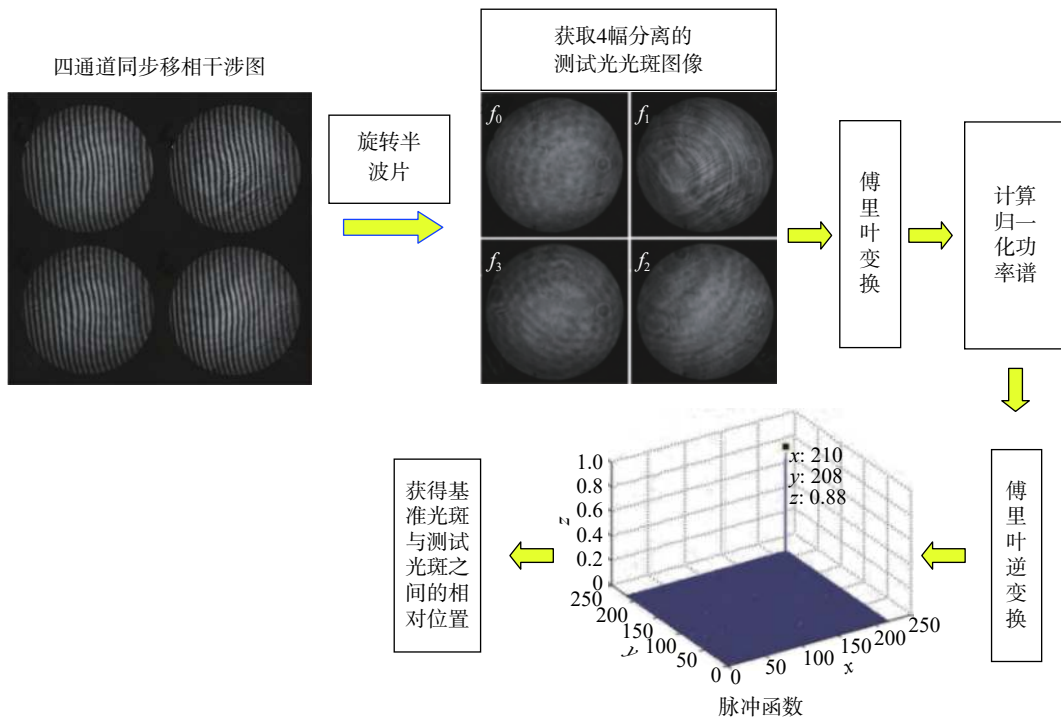


图 5 基于相位相关法的同步移相干涉图位置配准流程

Fig. 5 Position registration process of simultaneous phase-shifting interferograms based on phase correlation algorithm

对比分析上述两种位置配准方法的原理与结果可知, 基于统计分析原理的配准方法直接针对实验所获取的干涉图像进行分析计算, 原理简单, 操作便捷。基于相位相关算法的配准方法需屏蔽参考光波, 利用测试光斑位置来间接表示移相干涉图的相对位置关系; 由于干涉区域并不一定与测试光斑区域完全重合, 因此计算结果会存在偏差; 对于某些如共光路结构、非偏振干涉的

干涉仪系统来讲, 获取测试光斑图像存在困难。此外从应用效果来分析, 后者仅能获得四通道图像之间的相对位置关系, 同时在相位相关算法实施之前还需依靠其他手段分离提取出 4 个独立的测试光斑; 而前者还能同时计算出每一通道图像的有效区域, 因而相对来讲前者适用范围更广、通用性更好。

Servin 等<sup>[33-34]</sup>指出干涉图失配误差会对后续

相位复原产生影响,提出了改进的相位解调算法以降低适配误差的影响,目前所提方法仅适用于像素化干涉图。此外 Kimbrough 等<sup>[35]</sup>利用高阶等式分别表示干涉条纹的常数项与干涉项,进而通过优化高阶算法来降低常数项对复原结果的影响,也属于降低适配误差的算法。

综上所述,多通道同步移相干涉图位置配准问题并不能通过简单的算法优化来解决,而通过干涉区域分割进而实现位置配准是一种更为可行的技术方案,既实现了位置配准,同时还可以提取出每一通道干涉图的有效区域,其通用性好、自动化程度高。

### 3 横向剪切干涉图预处理

剪切干涉仪无需另外提供参考光波,可实现自参考干涉,容易建立共光路光学结构,抗干扰性好<sup>[36]</sup>。对于剪切干涉而言,其干涉图有效区域的轮廓并不规则,例如两束圆形孔径光波产生横向剪切干涉示意图如图 6 所示。因而其处理方法与上述两类干涉图像预处理有所差异,特别是横向剪切干涉图像预处理除了需提取干涉图有效区域外还需估计剪切量等参数,而剪切量估计的准确性直接影响后续波前复原精度<sup>[37-39]</sup>。

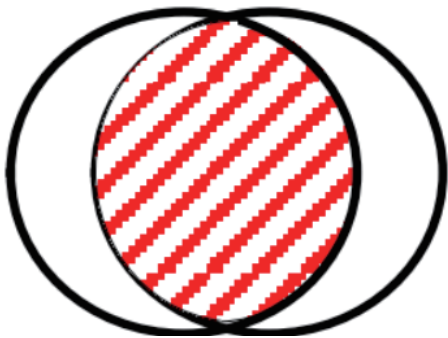
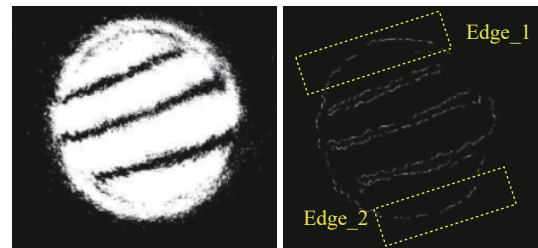


图 6 横向剪切干涉示意图

Fig. 6 Diagram of lateral shearing interference

郭向峰等<sup>[40]</sup>利用横向剪切干涉检测非球面反射镜面形时,对两波横向剪切干涉图像预处理进行研究。对被测物进行第一次成像得到干涉图后并不能确定干涉图在 CCD 像面中的位置,而且由于振动或其他因素的影响导致实际剪切量与设定剪切量存在偏差,因而需对横向剪切干涉图进行预处理来获得干涉数据区域去除多余像面、

计算实际剪切量。采用的预处理步骤为:(1)读入一帧横向剪切干涉图;(2)适当的中值滤波和对对比度调整,结果如图 7(a)所示,消除噪声并提高边缘提取质量;(3)canny 算子边缘提取;(4)手工提取孔径边缘圆弧段,如图 7(b)所示;(5)圆弧段拟合,计算圆心和半径;(6)计算实际剪切量。



(a) 干涉图

(b) 边缘检测图

图 7 横向剪切干涉图及其边缘检测

Fig. 7 Lateral shearing interferogram and edge detection

上述步骤和结果表明,孔径边缘圆弧段的提取需要将其和干涉条纹进行分离和筛选,而且孔径边缘的位置还会随着剪切光束的位置而变化,导致边缘提取难度较大,需要人工参与,自动化和可靠性差。其次,由于受到噪声、光源光强分布不均、准直光阑的影响,会使边缘检测结果出现边缘模糊的现象。

由横向剪切干涉图重构波前需要两个方向的波前差分数据<sup>[38]</sup>,为满足实时测量需要,方波等<sup>[41-46]</sup>研究了四波横向剪切干涉技术,可在一幅干涉图中提取两个正交方向的波前差分数据。然而,四波横向剪切干涉图中还包含两波干涉区域和三波干涉区域,这对四波干涉区域提取算法的研究提出了更大挑战。文献[42]、[46]采用灰度阈值判定法进行四波横向剪切干涉区域提取,提取结果不够准确,在处理过程中需反复调试灰度阈值,结合人工辅助查看,不便于实际应用。

根据上述分析可知,横向剪切干涉图区域分割需同时实现有效区域提取和剪切量参数估计,实现的任务与前述两类干涉图像区域分割有所不同,技术难度更大,挑战更多。目前横向剪切干涉图像处理多依靠常规数字图像处理,难以有效实现预期目标。因其今后针对横向剪切干涉图像乃至径向干涉图像的区域分割技术需开展更为深

人的研究工作。

## 4 结 论

干涉图像区域分割是各种类型数字波面干涉仪所面临的普遍问题和共性问题, 对于保证高精度相位复原、相位解包裹可靠实施以及改善实验数据分析效率具有重要意义。部分传统技术借助辅助手段或需人工参与, 不能实现自动处理。由于孔径衍射造成干涉图轮廓位置存在衍射条纹, 导致边缘轮廓难以清晰、准确分辨, 所以常规数字图像处理技术也不能获得满意的提取结果, 同时大多方法只适用于某一特定类型的干涉图像, 方法通用性差。比较而言, 基于统计分析的区域分割技术通用性较好, 易于实现, 结果可靠, 具有较好的应用前景。对于剪切干涉图像而言, 除了提取有效区域外还需通过分析剪切光束边缘轮廓来计算实际干涉图的剪切量或剪切比等参数, 对干涉图像预处理技术提出了更大挑战, 因此横向剪切干涉图像预处理技术有待深入研究。

### 参考文献:

- [1] 左芬, 陈磊. 移相干涉测量中的抗振技术 [J]. *光学技术*, 2007, 33(S1): 164 – 167, 170.
- [2] KAEWON R, PAWONG C, CHITAREE R, et al. Polarization phase-shifting technique for the determination of a transparent thin film's thickness using a modified Sagnac interferometer[J]. *Current Optics and Photonics*, 2018, 2(5): 474 – 481.
- [3] 潘思阳, 吴思进, 祝连庆, 等. 选择还原时间相位解包裹型数字散斑干涉技术 [J]. *自动化仪表*, 2016, 37(7): 34 – 36.
- [4] 马力, 韩道福. 用双光收缩式径向剪切干涉仪测量气体温度场 [J]. *光学学报*, 2005, 25(11): 1493 – 1496.
- [5] ZHOU Y F, ZOU H R, ZHONG L Y, et al. Dynamic refractive index distribution measurement of dynamic process by combining dual-channel simultaneous phase-shifting interferometry and total internal reflection[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 15231.
- [6] 时轮, 王池平, 王鹤, 等. 衍射光栅超精密位移定位检测新方法 [J]. *自动化仪表*, 2017, 38(4): 55 – 57.
- [7] SHIRAI T. Liquid-crystal adaptive optics based on feedback interferometry for high-resolution retinal imaging[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(19): 4013 – 4023.
- [8] MAJEED H, SRIDHARAN H, MIR M, et al. Quantitative phase imaging for medical diagnosis[J]. *Journal of Biophotonics*, 2017, 10(2): 177 – 205.
- [9] 万文博, 苏俊宏, 杨利红, 等. 干涉条纹图像处理的相位解包新方法 [J]. *应用光学*, 2011, 32(1): 70 – 74, 178.
- [10] 何勇, 朱日宏, 陈磊. 基于区域生长理论的波面解包算法研究 [J]. *光学技术*, 2006, 32(4): 594 – 597.
- [11] 郑东晖, 陈磊, 李博, 等. 同步移相干涉仪中的延迟阵列移相特性研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(04): 197 – 203.
- [12] MILLER J E, BROCK N J. Methods and apparatus for splitting, imaging, and measuring wavefronts in interferometry: US, 6304330B1[P]. 2001 – 10-16.
- [13] 蒋超, 郭仁慧, 张辉欣, 等. 基于四分之一波片的菲佐型同步移相干涉测量方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101203.
- [14] KEMAO Q, WU X P, ASUNDI A. Grating-based real-time polarization phase-shifting interferometry: error analysis[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(13): 2448 – 2453.
- [15] 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.
- [16] KIM J A, KIM J W, KANG C S, et al. Interferometric profile scanning system for measuring large planar mirror surface based on single-interferogram analysis using Fourier transform method[J]. *Measurement*, 2018, 118: 113 – 119.
- [17] CAO T N. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[C]//Proceedings of SPIE 1720, International Symposium on Optical Fabrication, Testing, and Surface Evaluation. Tokyo: SPIE, 1992: 581 – 585.
- [18] 勾鑫聪, 田爱玲, 朱学亮, 等. 偏振态对干涉条纹对比度的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 241202.
- [19] 吕绪浩. 光学元件干涉图数据的采集和处理方法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2015: 23.
- [20] 刘廷瑞, 何海涛. 高精度单幅干涉图自动处理方法 [J]. *光学仪器*, 2003, 25(5): 10 – 14.
- [21] 左芬, 陈磊, 徐晨. 同步移相干涉的测量性能 [J]. *中国激光*, 2007, 34(12): 1682 – 1687.
- [22] 葛锦蔓, 苏俊宏. 薄膜厚度测量的干涉图处理技术 [J]. *中国激光*, 2009, 36(S2): 252 – 256.
- [23] 吴双乐, 胡慧然, 钟诗民, 等. 散斑干涉条纹区域的自

- 动提取 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1212004.
- [24] 穆治亚, 艾华, 樊孝贺, 等. 采用整体最小二乘法的条纹图配准方法 [J]. 中国光学, 2016, 9(6): 625 – 632.
- [25] 樊孝贺. 短相干菲索型动态干涉仪的关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019: 49 – 73.
- [26] LI W J, ZHANG Q N, LI J S, et al. A simplified method of interferograms matching in the dual-channel phase-shifting interferometry[J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 457 – 462.
- [27] CHEN Y F, DU Y L. One-shot surface profile measurement using polarized phase-shifting[C]// Proceedings of SPIE 7511, 2009 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems. Shanghai: SPIE, 2009: 751102.
- [28] LI B, CHEN L, ZHAO B, et al. Spatial mismatch calibration using circular carrier technique in the simultaneous phase shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(8): 1037 – 1044.
- [29] 靳京京, 卢文龙, 郭小庭, 等. 基于 SURF 和 RANSAC 算法的同步相移干涉图位置配准方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1012002.
- [30] 田枫, 白福忠, 吴亚琴, 等. 基于统计分析方法的同步相移干涉图位置配准 [J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0626001.
- [31] ZHENG D H, CHEN L, YANG Y, et al. Spatial mismatch calibration based on fast partial phase correlation for interferograms in dynamic Fizeau interferometer[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(3): 034104.
- [32] KIIRE T, NAKADATE S, SHIBUYA M. Phase-shifting interferometer based on changing the direction of linear polarization orthogonally[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(21): 3784 – 3788.
- [33] SERVIN M, ESTRADA J C. Error-free demodulation of pixelated carrier frequency interferograms[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 18492 – 18497.
- [34] SERVIN M, ESTRADA J C, MEDINA O. Fourier transform demodulation of pixelated phase-masked interferograms[J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 16090 – 16095.
- [35] KIMBROUGH B, MILLERD J, WYANT J, et al. Low-coherence vibration insensitive Fizeau interferometer[C]// Proceedings of SPIE 6292, Interferometry XIII: Techniques and Analysis. San Diego: SPIE, 2006.
- [36] 彭爱华, 叶红卫, 李新阳. 孔径分布对横向剪切干涉仪波前复原的影响 [J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0401002.
- [37] LEE J R, YOON D J, KIM J S, et al. Investigation of shear distance in Michelson interferometer-based shearography for mechanical characterization[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(11): 115303.
- [38] RUI Z, YANG Y Y, LIANG Z J, et al. High-precision calibration method for shear ratio based on the shearing wavefront feature extraction of a phase plate[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(18): 5121 – 5129.
- [39] PENG C Z, TANG F, WANG X Z, et al. Calibration method of shear amount based on the optical layout of point source microscope for lateral shearing interferometric wavefront sensor[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(9): 094106.
- [40] 郭向峰. 非球面反射镜横向剪切干涉检测技术仿真与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 53 – 55.
- [41] 时凯, 苏俊宏, 白兆峰. 基于四波前横向剪切干涉仪的激光波前测试技术研究 [J]. 光学与光电技术, 2015, 13(6): 63 – 66.
- [42] 朱文华, 陈磊, 谷晨风, 等. 用于瞬态波前检测的四波横向剪切干涉系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 121201.
- [43] BELLANGER C, TOULON B, PRIMOT J, et al. Collective phase measurement of an array of fiber lasers by quadriwave lateral shearing interferometry for coherent beam combining[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 3931 – 3933.
- [44] 刘长青. 基于四波剪切干涉的光束质量测量技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2021: 9 – 18.
- [45] ZHU W H, LI J P, CHEN L, et al. Systematic error analysis and correction in quadriwave lateral shearing interferometer[J]. *Optics Communications*, 2016, 380: 214 – 220.
- [46] 方波. 基于位相光栅的四波横向剪切干涉法波前检测技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 48 – 50.

(编辑: 张 磊)