

光谱全息中动镜参量对重构图质量的影响研究

贺佳雪¹, 娄树理¹, 林超²

(1. 烟台大学 物理与电子信息学院, 山东 烟台 264005; 2. 海军航空大学 航空作战勤务学院, 山东 烟台 264000)

摘要:光谱全息作为一种能够同时记录物体空间信息和光谱信息的全息成像技术,具有广泛的应用前景。在光谱全息记录光路中,使用高精度位移台驱动的反射镜对参考光束进行相移控制并记录相应的白光全息图是实现单色全息图重构、进而实现物体空间和光谱信息重构的关键步骤。为了实现高质量的原始信息重构,深入分析了动镜不同位移参数对重构图像质量的影响。首先研究了位移步数对重构图像质量的影响,给出了在不同重构波长条件下的最优位移步数;在上述位移步数条件下,分析了位移对称度对重构图像质量的影响,提出了位移非对称度的参数并给出了其与重构质量的关系;最后,在上述两个参数的最优条件下,分析了位移精度在不同重构波长条件下对重构图像质量的影响。研究表明,在综合考虑全息记录速度、记录全息图数据量和重构图像质量三个条件下,位移步数越大,非对称度越小,位移精度越高,重构图像质量越高。上述研究结果对实验中电控位移台的选型以及精确控制位移参数提供了有力支撑。

关键词:全息;全息图像重构;位移参数;图像降噪

中图分类号: O438; TN26 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.05.019

Study on the effect of moving mirror parameters on the quality of reconstructed images in spectral holography

HE Jia-xue¹, LOU Shu-li¹, LIN Chao²

(1. School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China;

2. Aviation Operations and Service Institute, Naval Aviation University, Yantai 26400, China)

Abstract: Spectral holography, as a holographic imaging technology, can simultaneously record the spatial and spectral information of objects and holds promising application prospects. In the optical path of spectral holography recording, a mirror driven by a high-precision displacement stage is utilized to control the phase-shift of the reference beam and to record the corresponding white-light hologram. This is a crucial step in achieving the reconstruction of monochrome holograms, and subsequently the reconstruction of an object's spatial and spectral information. To realize high-quality reconstruction of the original information, the effects of different displacement parameters of the moving mirror on the reconstructed image quality are thoroughly analyzed. Firstly, the impact of the displacement step number on the reconstructed image quality is studied, and the optimal displacement step number under different reconstruction wavelength conditions is determined. Under the condition of the above displacement step, the influence of displacement symmetry

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62005318) 资助。

作者简介: 贺佳雪 (2000 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高光谱重构图像降噪、全息图像压缩等方面的研究。

E-mail: hjx0104hhh@s.ytu.edu.cn

通讯作者: 林超 (1987 -), 男, 博士, 讲师, 主要从事光学信息处理, 数字全息, 光学神经网络的研究工作。

E-mail: ves-tigelinchao@163.com

收稿日期: 2024-07-18

on the reconstructed image quality is analyzed, and a parameter for displacement asymmetry is proposed, along with its relationship to reconstruction quality. Finally, the influence of displacement accuracy on the reconstructed image quality under different reconstruction wavelength conditions is analyzed under the optimal conditions of the aforementioned two parameters. The results show that considering the holographic recording speed, the amount of recorded hologram data, and the reconstructed image quality, the larger the number of displacement steps, the smaller the asymmetry, the higher the displacement accuracy and the higher the reconstructed image quality. These findings provide robust supports for the selection of electronically controlled displacement stages and the precise control of displacement parameters in experiments.

Keywords: holography; holographic image reconstruction; displacement parameters; image denoising

1 引言

数字全息技术是一种利用光的干涉记录物体反射(透射)光的振幅及相位(折射率)分布并用数字计算的方式再现物体像的方法。随着图像传感器如 CMOS 的综合性能以及计算机算力的显著提升,数字全息技术得到快速发展。

传统数字全息术无法直接对物体的色彩信息进行记录,而颜色信息是物质的重要特征。彩色全息或多波长全息的发展为三维彩色物体的记录和重构提供了解决方法。彩色数字全息在三维彩色物体成像、显微、流体分析和形变测量等领域得到了广泛应用^[1-3]。通常,彩色全息的记录可以使用单色 CCD 或彩色 CCD:采用单色 CCD 连续记录不同波长的数字全息图,能够避免直接使用彩色 CCD 带来的采样率下降等问题,实现较高空间分辨力的图像重构^[4];采用彩色 CCD 并结合空分复用技术,可以同时记录不同波长的全息图,提高了记录的实时性^[5]。基于角度复用的多波长并行相移数字全息使用单色 CCD 并行记录多个波长的全息图,具有较高的空间分辨力和实时性^[6]。多波长复振幅分布的记录需要采用多个激光器或波长扫描激光器等相干光源,本质上是对不同波长的复振幅分布在时间或空间上分离后再分别记录^[7],或者对多波长复合全息图进行解调恢复出单波长图像。这种方式硬件系统复杂度较高且稳定性不强,所选激光器输出波长的准确性会影响颜色表征和恢复的精度,空间、偏振等复用方式还会一定程度上降低重构图像的空间分辨率。因此,彩色全息的高精度重构对于扩展其应用范围具有重要研究价值。

在全息重构过程中面临的一个重要挑战就是重构图像的质量问题。相干成像系统的噪声是重构图像质量下降的重要原因之一,因此产生了一系列全息图像降噪方法。针对全息重构图像的降噪方法主

要有三类。一是聚焦于前端噪声,噪声主要源于光源的强相干性,通过采用非相干或部分相干光源来记录全息图,能从源头上降低重构图像噪声^[8-9]。但光源相干性的改变会直接影响被记录物体的尺寸、条纹对比度等特性。二是采用光学方法,调整光路记录条件、对全息图进行多次记录等方法实现降噪。这类方法本质是通过记录具有不同噪声模式的多幅全息图,基于噪声多样性进行降噪,不同的散斑模式可以由多波长、多角度、多偏振态、多位置等参数调节来实现^[10-12]。但要实现不同的记录条件和散斑模式,通常会增加光学系统的硬件复杂度,间接降低系统稳定性。三是针对全息图或重构图,采用后端数字图像处理的方式进行降噪。典型的方法是基于滤波^[13]的方式降低图像中不同频率的噪声,例如小波变换、三维块匹配等方法^[14-16],以及基于深度神经网络的降噪方法^[17]。这些方法通常不需要记录多幅全息图,降低了光学系统的复杂度,增加了数字图像处理过程的复杂性,其降噪效果较好,但是会一定程度上影响系统的实时性。需要说明的是,将上述三种降噪方法结合使用,通常能够达到更优的降噪效果^[18]。

但是,仅仅基于三个波长的彩色全息,使用噪声多样性原理实现降噪的效果有限。基于上述原因,将显微成像领域中的光谱全息技术^[19-20]引入全息降噪研究中,通过增加光谱的分辨力,并深入分析多波长重构图像噪声水平之间的差异性,提出了基于加权求和平均和三维块匹配算法的降噪方法,并定量分析了其降噪效果^[21-22]。在前期工作中,我们从理论仿真和光学实验两个角度,一定程度上验证了该方法的有效性。然而,在光学实验采集全息图的过程中,由于硬件性能特别是线性位移台精度等的实际限制,采集的全息图会额外引入噪声,导致重构图像质量下降。为了定量分析全息记录过程中参考

光路动镜位移参数对重构图像质量的影响,本文从实验过程中实际限制条件出发,在满足基本重构条件的前提下,提炼了三个主要影响因素,系统分析对重构图像质量的影响。实验结果对于实验中器件精度的选型,以及实验操作中位移参量的控制等具有重要意义。

2 光谱全息记录和重构基本原理

以图 1 所示光学系统为例,对高光谱全息记录和重构的基本原理进行分析。将 3D 彩色物体或 2D 彩色图像放置在物光路中;在参考光路中,使用压电陶瓷(PZT)驱动的电控位移平台控制反射镜的连续运动。采用超连续(SC)激光器作为光源,经过空间滤波(SF)和扩束(BE)后,通过非偏振分束器(NPBS)分别照亮彩色物体和反射镜。合束后,由单色 CCD 采集光谱干涉图像集。

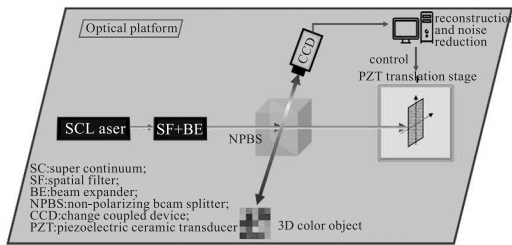


图 1 光学系统框架

Fig. 1 Optical system framework

SC 激光器的输出光谱 S 可近似由谱线宽度为 $\Delta\gamma_m$ 的单色平面波之和表示:

$$S = \sum E(\gamma_m) \exp(i2\pi\gamma_m z) \Delta\gamma_m \quad (1)$$

其中, $\gamma_m = \lambda_m^{-1}$ 表示波数; λ_m 为中心波长; $E(\lambda_m)$ 表示频谱宽度内振幅的平均值,对于输出特性一定的 SC 激光,该参数可以看作常数。 z 表示距离,其中 $z = 0$ 为物体平面,因此物体的光谱复振幅反射(投射)率可表示为:

$$O(\gamma_m, x, y) = |O(\gamma_m, x, y)| \exp[i\phi(\gamma_m, x, y)]$$

式中, x, y 为物体平面的坐标。

对于单个光谱分量而言,设物体与 CCD 之间的距离为 z_1 ,当物体的尺寸和衍射距离满足傍轴条件时,可以使用菲涅耳衍射积分进行计算,CCD 所在平面上的复振幅为:

$$O_1(\gamma_m, x_1, y_1) = \mathfrak{F}_{z_1} \{E(\gamma_m) O(\gamma_m, x, y)\} \\ = \exp(i2\pi\gamma_m z_1) \exp\left[\frac{i\pi\gamma_m}{z_1}(x_1^2 + y_1^2)\right] \cdot$$

$$F\left\{E(\gamma_m) O(\gamma_m, x, y) \exp\left[\frac{i\pi\gamma_m}{z_1}(x^2 + y^2)\right]\right\} \quad (2)$$

其中, x_1, y_1 为 CCD 平面的坐标。

在参考光路中,预设反射镜的初始位置从而确保物与参考光之间的光程差为零,并通过控制位移台精准调整反射镜的位置,因此 CCD 平面上参考光的复振幅分布为:

$$R(\gamma_m, x_1, y_1, \delta) = \mathfrak{F}_{z_2} \{E(\gamma_m) \exp(i2\pi\gamma_m(z_1 + \delta))\} \quad (3)$$

其中, $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$, δ_0 为反射镜的位移大小; $\Delta\delta$ 为位移台在移动过程中产生的误差。理论上,干涉只发生在相干体积内具有相同波数或相对相同波束的光束之间,因此,单个光谱分量的干涉图为:

$$I(\gamma_m, x_1, y_1, \delta) = |O_1(\gamma_m, x_1, y_1) + R(\gamma_m, x_1, y_1, \delta)|^2 \\ = |E(\gamma_m)|^2 |\mathfrak{F}_{z_1} \{O(\gamma_m, x, y)\} + \exp(i2\pi\gamma_m \delta) \cdot \mathfrak{F}_{z_1} \{\exp(i2\pi\gamma_m z_1)\}|^2 \quad (4)$$

令 $A(\gamma_m, x_1, y_1) = \mathfrak{F}_{z_1} \{O(\gamma_m, x, y)\}$, $B(\gamma_m, x_1, y_1) = \mathfrak{F}_{z_1} \{\exp(i2\pi\gamma_m z_1)\}$ 则 CCD 相机记录的总强度为所有光谱分量干涉图的非相干叠加,即:

$$I_w(x_1, y_1, \delta) = \sum_{m=1}^M |S(\gamma_m)|^2 \cdot$$

$$|A(\gamma_m, x_1, y_1) + B(\gamma_m, x_1, y_1) \exp(i2\pi\gamma_m \delta)|^2 \quad (5)$$

消除公式(5)中的零级项,可得:

$$I_c(x_1, y_1, \delta) = \sum_{m=1}^M |S(\gamma_m)|^2 [A(\gamma_m, x_1, y_1) \cdot B^*(\gamma_m, x_1, y_1) \exp(-i2\pi\gamma_m \delta) + A^*(\gamma_m, x_1, y_1) \cdot B(\gamma_m, x_1, y_1) \exp(i2\pi\gamma_m \delta)] \quad (6)$$

其中, $*$ 表示共轭。

为得到重构图像,首先,通过傅里叶逆变换重建出 CCD 平面中的单个光谱干涉项:

$$\int I_c(x_1, y_1, \delta) \exp(i2\pi\gamma'_m \delta) d\delta = \sum_{m=1}^M \int |S(\gamma_m)|^2 \cdot [A(\gamma_m, x_1, y_1) B^*(\gamma_m, x_1, y_1) \exp[i2\pi(\gamma'_m - \gamma_m)\delta] d\delta \\ + \sum_{m=1}^M \int |S(\gamma_m)|^2 [A^*(\gamma_m, x_1, y_1) B(\gamma_m, x_1, y_1) \cdot \exp[i2\pi(\gamma'_m + \gamma_m)\delta] d\delta \quad (7)$$

其中,光谱成分 γ'_m 可以通过公式(6)与 $\exp(i2\pi\gamma'_m \delta)$ 相乘得到。

将基于狄拉克函数的傅里叶积分:

$$\int \exp[i2\pi(\gamma'_m + \gamma_m)\delta] d\delta = \delta_D(\gamma'_m \pm \gamma_m) \text{ 代入}$$

公式(7),进一步推导可得到任意单个光谱分量 γ'_m 的重构干涉项为:

$$A(\gamma'_m, x_1, y_1) B^*(\gamma'_m, x_1, y_1) = \frac{\int I_c(x_1, y_1, \delta) \exp(i2\pi\gamma'_m \delta) d\delta}{|S(\gamma'_m)|^2} \quad (8)$$

然后,基于菲涅耳逆变换得到每个光谱分量的复振幅分布,可以重构出 3D 彩色物体的第 m 个光谱分量的图像,即:

$$O(\gamma'_m, x, y) = \mathfrak{F}_{-z1} \left\{ \frac{\int I_c(x_1, y_1, \delta) \exp(i2\pi\gamma'_m \delta) d\delta}{|S(\gamma'_m)|^2} B(\gamma'_m, x_1, y_1) \right\} \quad (9)$$

在上述理论推导中,公式(7)是由白光干涉图像计算出单色干涉图像,进而实现单波长图像重构的关键步骤。公式在理论上给出了最优化重构的关键,即积分区间趋于无限大。然而,在实际光路中,由于电控位移台行程和精度的限制,无法做到位移区间的任意大,且实际位移是离散的,而不是连续的,因此,实验过程中位移步数和每一步位移的精度必然会偏离理想值,进而影响重构图像质量。为了系统研究位移步数及精度等因素对不同波长重构图像质量影响的差异,选取 449 nm、625 nm、801 nm 三个波长为例进行分析,对其进行数值模拟得到对应波长重构图像,并给出重构图像质量随波长和位移参数的变化规律。由于只考虑位移参数的影响,仅以强度成像为例进行分析。使用峰值信噪比 (PSNR) 衡量重构图像的质量,其计算公式为:

$$P_{\text{SNR}} = 10 \times \log_{10}(M_{\text{AX}}^2 / M_{\text{SE}}) \quad (10)$$

对于 8 位图像, M_{AX} 通常为 255; M_{SE} 为均方误差 (Mean Squared Error),表示原始图像与重构图像之间的差值平方和的平均值,其中原始图像为对应波长下使用光谱成像系统采集得到的光谱图像。因此,均方误差越小,峰值信噪比的值越大,这也意味着重构图像与原始图像越相似,即重构图像质量越好。

3 结果与分析

在数值模拟过程中,首先使用 Gooch & Housego HSi-300 型高光谱成像系统,在设定波长范围 449 ~ 801 nm、光谱分辨率为 4 nm 的条件下,对一个彩色魔方物体的特定表面采集了一组 89 幅单波长原始

光谱图像。然后,基于菲涅耳衍射原理模拟全息记录与重构过程,其中,数值模拟中空间采样间隔为 20 μm ,菲涅耳衍射距离 $z = 400 \text{ mm}$ 。最后根据公式(1) ~ (9) 仿真模拟记录与重构过程,得到对应波长下的重构图像,将理想位移参数条件下的重构图像作为原始重构图像,分析位移步数、位移对称度和位移精度三个参数变化时重构图像和原始重构图像的差异。

3.1 位移步数对重构图像质量的影响

基于上述原理及记录条件,由公式(7)中的积分可知,位移台的位移量及对应的积分区间均可能影响重构图像的质量。根据光谱全息基本原理,运动行程的选取会对重构图像的精度产生影响。以 449 nm、625 nm、801 nm 为例,分析运动行程即位移步数 n (以光程差零点为中心,前后取 100、200、400、800,即位移步数 n 取 201、401、801、1601) 对重构图像质量的影响。根据干涉基本原理,波长越长,理论上干涉图条纹间距更大且清晰直观。因此,在实验过程中,以波长 801 nm 为例,分别对位移步数为 201、1601 两种情况进行对比分析。全息图中的条纹均匀性反映了利用多波长全息图计算的单波长全息图的精度。如果条纹不均匀,则意味着多个波长的全息图混叠在一起,同时也说明由于步数不足,其他波长在积分和求和中未能得到有效消除,进而引入了噪声。因此,条纹的不均匀性在频谱图里反映为高频噪声。基于信息熵的定义引入频谱熵 H_s ,通过频谱密度的概率分布衡量频谱的复杂性和不确定性。 H_s 大表示频谱能量分布均匀,信号成分多且分散; H_s 小表示频谱能量集中在少数频率成分上,信号成分少且集中。因此频谱熵 H_s 来表征条纹的均匀程度, H_s 越小表明全息图中的条纹分布更加均匀,频域能量更集中, H_s 的计算公式为:

$$H_s = - \sum_f P(f) \log_2 [P(f) + \varepsilon] \quad (11)$$

其中, $P(f) = |X(f)|^2 / \sum_f |X(f)|^2$ 为归一化的频谱密度函数值, $|X(f)|^2$ 为频谱幅度的平方,表示在频率 f 处的功率;为避免对数计算时出现无穷大引入常数 ε 。通过计算,当 $n = 201$ 时, $H_s = 6.730$; 当 $n = 1601$ 时, $H_s = 6.506$,条纹更加均匀。同时,不均匀的条纹图像会包含更多噪声,这些噪声则会在空间域中表现为高频分量,即频谱图像中出现的尖峰干扰,如图 2(d)、(i) 中方框标注所示,会在一

定程度上影响重构图像的质量。图 2 为该条件下对应的全息图像、频谱图像及重构图像及部分放大的对比图。从图中可以直观看出,随着步数的增加,全息图中的条纹更加均匀,对应的频谱图中的高频噪声逐渐减小即图 2(d)、(i) 中干扰变小,重构图像的质量越好。

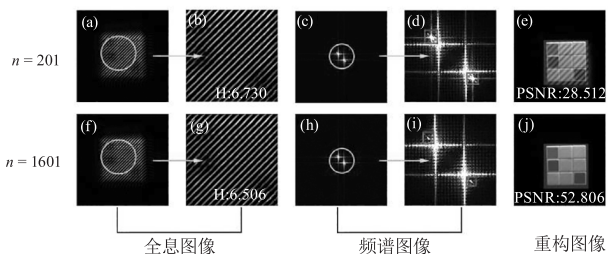


图 2 801 nm 处不同位移步数下对比图

Fig. 2 Comparison plots at different displacement steps at 801 nm

在 449 nm、625 nm、801 nm 三个波长下,位移步数对重构图像峰值信噪比 PSNR 的影响如图 3 所示。从曲线图中可以发现,对于任意波长而言,位移步数越大,重构图像质量越高,这与公式(7)相吻合。因此,为了保证一定的重构精度,波长越长,需要的位移步数或位移量越大。当峰值信噪比 PSNR 达到 30 dB 时,图像的质量就可以满足要求即视觉效果可以接受。实际记录过程中需要逐个对每一波长进行位移并记录,因此实验中总的记录时间为各个波长的记录时间之和。考虑到整个记录过程的实时性,应对每个波长选取相应的最优步数来确保总时间最短且记录的数据量最小,而不是对所有波长统一使用一个步数。因此,综合考虑记录的实时性、全息图数据量和重构精度,设置 30 dB 为 PSNR 阈值,在不同波长下合理设置和优化位移步数,即 449 nm 处选定 201 步,625 nm 处选定 401 步,801 nm 处选定 801 步。

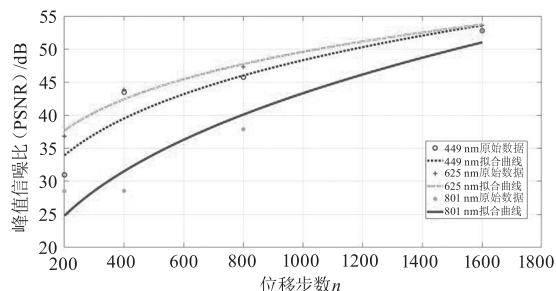


图 3 位移步数与重构图像峰值信噪比 PSNR 之间的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between the number of displacement steps and the peak signal-to-noise ratio PSNR of the reconstructed image

3.2 位移对称度对重构图像质量的影响

在积分过程中,积分区间的对称性也会对重构图像的质量造成一定影响。只有当两束光波的光程差 L 与波长 λ 的比值接近整数时,会产生明显的干涉效应,即 $L = k\lambda$, k 为整数。定义非对称度 α 为记录过程中光程差零点位置和真实光程差零点位置的偏移比例,即 $\alpha = \Delta L / (L/2) = 2\Delta L / n\lambda$, 其中 ΔL 表示光程差零点位置的偏移量, n 为位移步数。由公式(7)可知,应该保证光程差零点左右的采样数足够且相同,才能从光谱全息图中计算出准确的单波长全息图。对比 449 nm 与 801 nm 处不同位移对称度对全息图像、频谱图像及重构图像的影响,如图 4 所示。在 449 nm 处,当非对称度 α 增加至 50 % 时, H_s 减小至 6.222, 条纹变均匀, 频谱中的高频噪声减小, 重构图像的质量提升; 当 α 增加至 75 % 时, H_s 增加至 6.231, 条纹的均匀度下降, 对应频谱内高频噪声的影响增强, 重构图像质量变差。在 801 nm 处, 当 α 增加至 50 % 时, H_s 增加至 6.507, 条纹均匀性变差, 频谱中高频噪声即尖峰强度增加, 重构图像的质量变差; 当 α 增加至 75 % 时, H_s 减小至 6.5612, 条纹的均匀度回升, 频谱内对应部分强度减弱, 重构图像质量得到提升。并且, 从全息图像中可以看出, 801 nm 的条纹间距均匀性受非对称度影响较大。

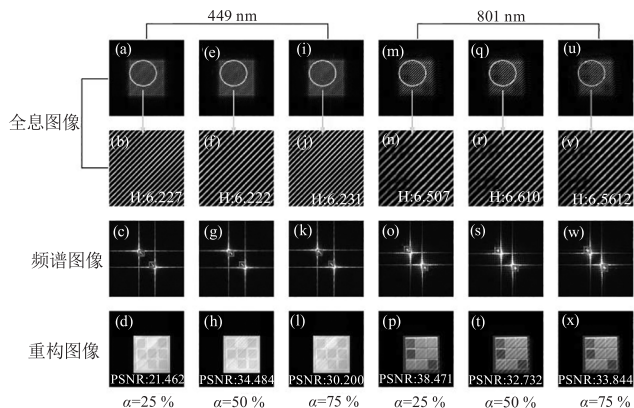


图 4 449 nm 与 801 nm 处不同对称度下对比图

Fig. 4 Comparison images at 449 nm and 801 nm with different degrees of symmetry

图 5 为非对称度对 449 nm、625 nm、801 nm 三个波长重构图像峰值信噪比 PSNR 的影响曲线。从曲线图中可以发现, 当实验中零点偏移导致非对称度增加时, 重构图像质量相比完全对称的理想情况有所下降, 随着偏离量的增加, 重构图像质量持续下降。然而, 当非对称度接近 1 时, 双边积分趋于单边积分, 重构图像质量将有一定程度提升。波长越长 (801 nm、

625 nm),该现象越显著,对于 449 nm 的图像来说,其 PSNR 值随着非对称度的变化在一定范围内波动,因而对重构图像质量影响相对较小。因此,在实际记录过程中,对于较长波长应尽量保证积分区间的对称性即非对称度,在此基础上能够较好保证重构图像的质量。但是相比于位移步数参量,总体来说,对称度对重构图像质量影响较小(PSNR 变化范围不大,如图 5 所示)。

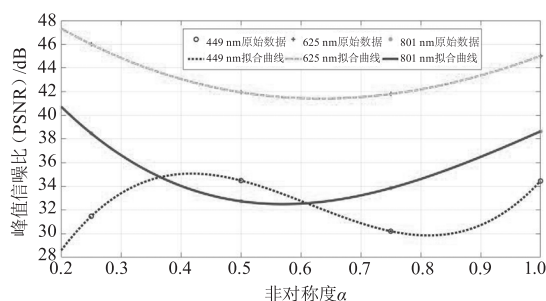


图5 非对称度与重构图像峰值信噪比 PSNR 之间的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between asymmetry and peak signal-to-noise ratio PSNR of reconstructed image

3.3 位移精度对重构图像质量的影响

为完整记录特定波长下的全部条纹信息,理论上位移台每次的步进距离必须与当前光源的波长一致。然而,在实际光路中,受限于位移台的运动精度,在移动过程中会在理想位移值的基础上发生偏移,可以看作在记录过程中存在的噪声。因此,定义噪声强度 σ 为每一步位移量偏离理想值的百分比,即位移误差与波长的百分比 $\sigma = \Delta\delta/\lambda$, 其中 $\Delta\delta$ 为位移误差。同样以效果最显著的 801 nm 为例,分别在噪声强度为 0.025、0.1 两种情况下进行对比分析,图 6 为该条件下对应的全息图像、频谱图像及重构图像及部分放大图的对比图。从图中可知,随着噪声水平的增加, H_v 则从 6.561 增大为 7.656,全息图像中条纹不均匀性增加,进一步引入了噪声,即表现为频谱图像中尖峰部分强度的增加,最终导致重构图像的质量变差。

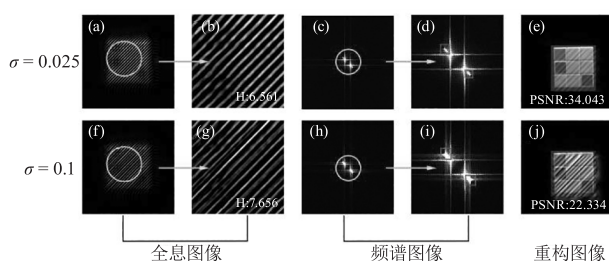


图6 801 nm 处不同噪声强度下对比图

Fig. 6 Comparison plots at different noise intensities at 801 nm

图 7 为噪声水平对 449 nm、625 nm、801 nm 三个波长重构图像峰值信噪比 PSNR 的影响曲线。从曲线图中可以看出,对于所有波长,重构图像质量随噪声水平提高而下降。因此,可选用精度更高的位移台、合理设置步进距离以减小位移误差的影响或使用多次测量取平均的方式减小影响。

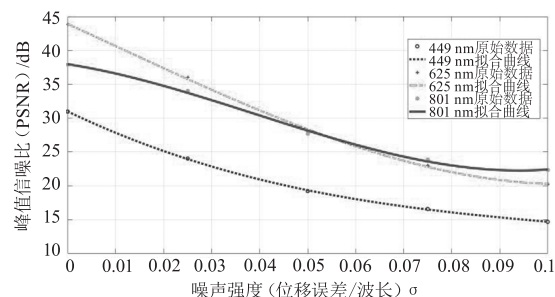


图7 噪声强度与重构图像峰值信噪比 PSNR 之间的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between noise intensity and peak signal-to-noise ratio PSNR of reconstructed image

4 结论

本文基于光谱数字全息记录和重构原理,从理论上分析了在全息记录过程中可能存在的问题,并予以验证、提出了相应的优化建议。在实验采集过程中提炼出位移步数位移对称度及位移精度三个重要参量,以 449 nm、625 nm 和 801 nm 三个波长为例,分析上述参数对不同波长重构图像质量的影响。通过控制运动参数,分析在不同条件下重构单波长全息图的频谱图中噪声的变化,进而研究重构图像质量随运动参数的变化规律。研究结果表明,在综合考虑全息记录速度、记录全息图数据量和重构图像质量三方面要求下,位移步数越大,非对称度越小,位移精度越高,重构图像质量越高,即在实际光路中,应合理设置位移步数,尤其是根据不同波长的需求进行优化;使用高精度位移台、定期校准,可以减少位移误差;同时应当尽量保证区间的对称性。上述研究成果为实验中电控位移台的选择和位移参数的精确控制提供了重要的参考依据。

参考文献:

- [1] Feng F, Tian A L, Liu B C. Full-field three-dimensional test for scratch defects using digital holographic scanning imaging system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (4): 0409003.
- [2] Wen K, Ma Y, Zhang M L. Quantitative phase microscopy with high stability[J]. Laser & Optoelectronics Progress,

- 2020,57(20):200001.
- [3] Dese J M, Olchewsky F. Dual-reference digital holographic interferometry for analyzing high-density gradients in fluid mechanics[J]. Optics Letters, 2018, 43(8):1635–1638.
- [4] Memmolo P, Bianco V, Paturzo M, et al. Encoding multiple holograms for speckle-noise reduction in optical display[J]. Optics Express, 2014, 22(21):25768–75.
- [5] Kim M K. Full color natural light holographic camera[J]. Optics Express, 2013, 21(8):9636–9642.
- [6] Tahara T, Ito Y, Lee Y, et al. Multiwavelength parallel phase-shifting digital holography using angular multiplexing[J]. Optics Letters, 2013, 38(15):2789–2791.
- [7] Zheng Huadong, Wang Zhen, Peng Junchang. Multiplane color holographic display based on time-division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(3):0309001. (in Chinese)
郑华东, 王震, 彭俊昌. 基于时分复用的多平面彩色全息显示[J]. 光学学报, 2024, 44(3):0309001.
- [8] Yang Xufeng. Research of incoherent digital holography imaging experiment and performance[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. (in Chinese)
杨旭峰. 非相干数字全息成像实验及性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [9] Zheng Mengjie, Du Yanli, Huang Songtao, et al. Incoherent self-interference digital holographic imaging under structured light illumination[J]. Opto-Electron Eng, 2022, 49(7):210451. (in Chinese)
郑梦杰, 杜艳丽, 黄松涛, 等. 结构光照明下的非相干自干涉数字全息成像[J]. 光电工程, 2022, 49(7):210451.
- [10] Jiang H, Zhao J, Di J. Digital color holographic recording and reconstruction using synthetic aperture and multiple reference waves[J]. Optics Communications, 2012, 285(13–14):3046–3049.
- [11] Rong L, Xiao W, Pan F, et al. Speckle noise reduction in digital holography by use of multiple polarization holograms[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(7):653–655.
- [12] Du Tongyao, Kong Yong, Xu Xueying et al. Speckle denoising based on arbitrary polarization state in digital holography[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(7):900–904. (in Chinese)
杜彤耀, 孔勇, 徐雪莹, 等. 基于任意偏振态的数字全息散斑去噪[J]. 激光与红外, 2019, 49(7):900–904.
- [13] Chen G, Li Q. Markov chain Monte Carlo sampling based terahertz holography image denoising[J]. Applied Optics, 2015, 54(14):4345–4351.
- [14] Li W, Piao M L, Alam M A, et al. Noise reduction in digital hologram using wavelet transforms and smooth filter for three-dimensional display[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(3):6800414–6800414.
- [15] Bianco V, Memmolo P, Paturzo M, et al. Quasi noise-free digital holography[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(9):e16142–e16142.
- [16] Li Yaxuan, Ye Fei, Zhang Yongang et al. Infrared holographic noise reduction algorithm based on improved three dimensional block matching filtering[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(10):1602–1609. (in Chinese)
李亚轩, 叶飞, 张永安, 等. 基于改进三维块匹配滤波的红外全息降噪算法[J]. 激光与红外, 2023, 53(10):1602–1609.
- [17] Liu Juntong, Gui Jinbin, Chen Aishuai, et al. Color hologram reconstruction based on deep learning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(8):0809001. (in Chinese)
刘俊彤, 桂进斌, 陈艾帅, 等. 基于深度学习的彩色全息图重建[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(8):0809001.
- [18] Bianco V, Memmolo P, Paturzo M, et al. On-speckle suppression in IR digital holography[J]. Optics Letters, 2016, 41(22):5226–5229.
- [19] Kalenkov S G, Kalenkov G S, Shtanko A E. Spectrally-spatial Fourier-holography[J]. Optics Express, 2013, 21(21):24985–24990.
- [20] Kalenkov S G, Kalenkov G S, Shtanko A E. Hyperspectral holography: an alternative application of the Fourier transform spectrometer[J]. JOSA B, 2017, 34(5):B49–B55.
- [21] Lin C, Han Y, Lou S, et al. High spectral and spatial resolved encryption and decryption of 3D color object based on holographic imaging spectroscopy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 145:106669.
- [22] He Jiaxue, Lou Shuli, Lin Chao. Noise reduction method for spectral holographic reconstructed images based on noise discreteness[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(9):0907001. (in Chinese)
贺佳雪, 娄树理, 林超. 基于噪声差异性的光谱全息重构图像的降噪方法[J]. 光学学报, 2024, 44(9):0907001.