

引用格式: 张光炜 孟浩然 桂甸, 等. 并行相移同轴数字全息偏振成像方法 [J]. 电光与控制, 2024, 31(3): 104-109. ZHANG G W, MENG H R, GUI D, et al. A polarization imaging method based on parallel phase-shifting coaxial digital holography [J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31(3): 104-109.

并行相移同轴数字全息偏振成像方法

张光炜^{1,2}, 孟浩然¹, 桂甸^{1,2}, 杨昊^{1,2}, 刘欣悦¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130000; 2. 中国科学院大学, 北京 100000)

摘要: 为了研究并行相移同轴数字全息系统中偏振态传输的问题, 提出考虑偏振的并行相移同轴数字全息系统的修正模型, 并依据此模型提出偏振成像方法。首先, 介绍了理想情况下并行相移同轴数字全息的原理, 然后, 介绍了考虑偏振的并行相移同轴数字全息修正模型, 最后, 基于此模型提出了实现偏振成像的方法。实验结果验证了模型的可行性, 通过这种方法可以得到外表信息, 成像分辨率可达到 $14\ \mu\text{m}$ 。该方法扩充了数字全息系统的功能, 通过该系统可以对物体的偏振态进行成像。

关键词: 数字全息; 并行相移; 偏振成像; 斯托克斯参量

中图分类号: O438.1 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2024.03.018

A Polarization Imaging Method Based on Parallel Phase-Shifting Coaxial Digital Holography

ZHANG Guangwei^{1,2}, MENG Haoran¹, GUI Dian^{1,2}, YANG Hao^{1,2}, LIU Xinyue¹

(1. Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: In order to study the issue of polarization state transmission in parallel phase-shifting coaxial digital holographic system, a modified model of parallel phase-shifting coaxial digital holographic system considering polarization is proposed, and a polarization imaging method is proposed based on this model. Firstly, the principle of parallel phase-shifting coaxial digital holography under ideal conditions is introduced. Then, the modified model of parallel phase-shifting coaxial digital holography considering polarization is introduced. Finally, based on this model, a polarization imaging method is proposed. The experimental results verify the reliability of the model. The appearance information can be obtained by using this method, and the imaging resolution can reach $14\ \mu\text{m}$. This method expands the functions of digital holographic system. Through this system, the polarization state of the object can be imaged.

Key words: digital holography; parallel phase-shifting; polarization imaging; Stokes vector

0 引言

数字全息技术是计算光学领域的一门新兴成像技术。数字图像传感器的出现使全息术向数字全息技术发展^[1-2]。随后数字全息技术被应用于相位测量^[3], 并出现了通过加入相移器件实现全息的相移全息术^[4]。基于偏振像素掩膜的同步相移数字全息技术具有光学调试简单与大范围消色差相移等优势^[5]。偏振相机的

出现解决了偏振像素掩膜同步相移数字全息技术关键的核心器件问题^[6]。目前并行相移同轴数字全息系统在许多领域, 尤其是微生物观测领域有重要的应用^[7-9]。

并行相移同轴数字全息系统使用偏振光束干涉。偏振描述光的电场分量的振动情况, 是光的一种重要物理特性^[10]。光在通过物体时其偏振性质会发生变化, 由于物体粗糙程度、材料性质、外表纹理和观测角度的不同, 会产生不同的偏振特性^[11]。然而, 在现有的并行相移数字全息模型中, 物光被简化为完全线偏振光, 理想模型未考虑物体对偏振光的调制, 导致物光信息未被完全利用。针对这一问题, 本文提出了一种考虑物光偏振态的四步相移数字全息系统模型, 用于得到更多维度的信息。该模型考虑了干涉的偏振条

收稿日期: 2023-04-19 修回日期: 2023-05-25

基金项目: 中国科学院院级科技专项(D02020006305)

作者简介: 张光炜(1998—), 男, 四川成都人, 硕士。

通讯作者: 孟浩然(1980—), 男, 满族, 吉林长春人, 博士生, 副研究员, 硕导。

件,建立了同轴数字全息四步相移系统的偏振修正模型。更进一步地,由于数字全息系统所测量的振幅与相位信息可以拓展到偏振成像所测量的偏振信息,利用偏振信息对物体实现成像。通过测量光的偏振状态并反演物体的表面信息对物体成像的成像方式称为偏振成像^[12]。偏振成像在光强的空间分布信息的基础上增加了偏振度、偏振角、偏振椭率等偏振的信息^[13],在军事观测^[14-16]、医疗检测^[17-18]、水下探测^[19-21]等领域有广泛应用。将偏振与全息相结合,有利于开展对小体积、低成本、易调试的光学系统的研究^[22]。

本文提出考虑偏振的并行相移同轴数字全息修正模型,该模型考虑了物体对物光的偏振调制。在该模型的基础上,本文提出了并行相移同轴数字全息偏振成像方法,通过两束不同偏振态的参考光分别与物光干涉,使用偏振图像传感器采集全息图像,反演物光在两个正交方向上的振幅相位信息,最后使用衍射角谱法重建物光复振幅,从而实现偏振成像。基于数字全息的偏振成像系统在医学、生物检测等方面有广阔的应用前景,同时有利于数字全息中孪生像的去除的研究,并可能通过偏振成像的方式实现基于数字全息的三维成像。

1 理想并行相移同轴数字全息模型

图1为传统同轴并行四步相移数字全息偏振成像系统结构图。

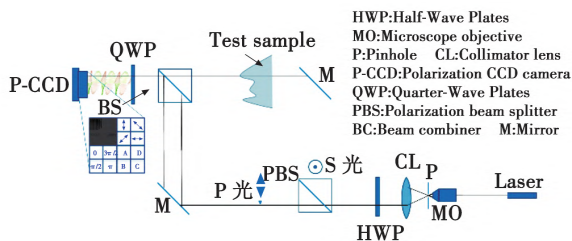


图1 传统同轴并行四步相移数字全息偏振成像系统结构

Fig. 1 Structure of traditional coaxial parallel four-step phase-shifting digital holography polarization imaging system

本文采用马赫曾德同轴全息光路结构实现双光束干涉,该系统具有结构紧凑、调试简单、系统稳定等优点^[23]。光源为激光器输出的线偏振光,光束经过空间滤波器滤波扩束后,通过1/2波片。光束经偏振分光棱镜反射出S线偏振光,同时透射出P线偏振光。P线偏振光用作参考光,S线偏振光用作目标照明光。旋转偏振片P可以实现光强的连续调节,旋转1/2波片的线偏振方向可以改变PBS分出的物光和参考光的强度比。在参考光路放置1/4波片,可改变参考光的偏振态。物光波与参考光波经衍射传播后,通过合束棱镜合成。调节合束棱镜BS的角度,可以使物光与参

考光近似同轴。物光和参考光在靶面产生干涉,并被采集生成全息图。

物光 $O(x, y)$ 和参考光 $R(x, y)$ 分别为水平和垂直方向的线偏振光,其复振幅分别表示为 $A_o \exp(j\varphi_o)$ 和 $A_R \exp(j\varphi_R)$ 。通过波片后为左旋和右旋圆偏振光。干涉光束通过偏振片产生 α_k 的相移,相移后相机靶面接收到的光强为

$$I(x, y, \alpha_k) = A_o^2 + A_R^2 + 2A_o A_R \sin(\varphi_o - \varphi_R + 2\alpha_k) \quad (1)$$

取相移 α_k 分别为0 rad, $\pi/4$ rad, $\pi/2$ rad, $3\pi/4$ rad, 代入式(1),可得到物光复振幅为

$$O(x, y) R^*(x, y) = I(x, y, 0) - I(x, y, \pi) + j[I(x, y, 3\pi/2) - I(x, y, \pi/2)] \quad (2)$$

采用数值计算方法进行重构得出数字全息的重构像。本文采用角谱法,算式如下

$$U(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{O(x, y) R^*(x, y)\} H(f_x, f_y)\} \quad (3)$$

式中 $H(f_x, f_y)$ 为传递函数,表示为

$$H(f_x, f_y) = \exp\left(jkz_0 \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right) \quad (4)$$

式中: z_0 为重构距离; λ 为激光器输出光的波长。

2 考虑偏振的并行相移同轴数字全息偏振成像模型

现有的同轴四步相移数字全息系统模型往往假设物光和参考光均为线偏振光,这些假设是为了保证经过波片调制成圆偏光在相机靶面干涉,从而利用四步相移抑制零级像与孪生像。然而在实际应用中,光在通过物体时偏振状态会产生变化。这使得物光不再是线偏振光,靶面也不再是圆偏振光束,将复杂偏振态的物光束考虑成简单线偏振光会导致信息的损失。为了获得准确的信息,需要建立考虑偏振的修正模型并优化成像方法。

理想模型将物光和参考光表示为简单线偏振光,而并未考虑物光的偏振状态变化。要对该模型进行修正,需要将复振幅用偏振光的表示方法表示。因此将物光和参考光用琼斯矩阵分别表示为

$$O(x, y) = \begin{pmatrix} O_x(x, y) \\ O_y(x, y) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R(x, y) = \begin{pmatrix} R_x(x, y) \\ R_y(x, y) \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中: $O_x(x, y)$ 和 $O_y(x, y)$ 分别为物光复振幅在水平和垂直方向的投影; $R_x(x, y)$ 和 $R_y(x, y)$ 分别为参考光复振幅在水平和垂直方向的投影。这种表示方法将光束的复振幅投影为两个垂直方向的复振幅分量。由于方向正交的光束不产生干涉,因此在分析偏振光的干涉现象时,可以将光束分解为水平方向和垂直方向的分

量,两束水平方向的分量光和两束垂直方向的分量光分别独立产生干涉。全息图干涉过程的偏振分解如图2所示。

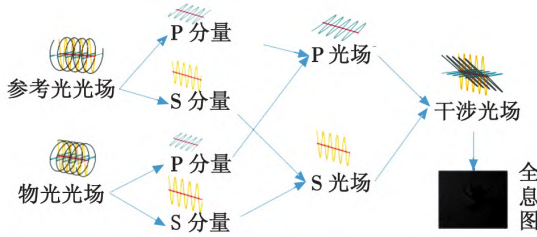


图2 全息图干涉过程的偏振分解示意图

Fig. 2 Polarization decomposition diagram of hologram interference process

使用偏振方向 α_k 偏振片可以将干涉场投影。偏振片后的光强为

$$I(x, y, \alpha_k) = [O_{\alpha_i}(x, y) + R_{\alpha_i}(x, y)] \cdot [O_{\alpha_i}^*(x, y) + R_{\alpha_i}^*(x, y)] \quad (7)$$

式中 $O_{\alpha_i}(x, y)$ 和 $R_{\alpha_i}(x, y)$ 分别为物光和参考光在该方向的投影,其表达式为

$$O_{\alpha_i}(x, y) = O_x(x, y) \cos \alpha_k + O_y(x, y) \sin \alpha_k \quad (8)$$

$$R_{\alpha_i}(x, y) = R_x(x, y) \cos \alpha_k + R_y(x, y) \sin \alpha_k \quad (9)$$

为验证该修正模型正确性,将偏振片偏振方向调节为水平和垂直,分别采集物光和参考光光场在垂直和水平方向的分布图像,结果如图3和图4所示。

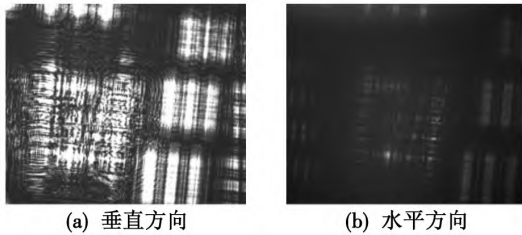


图3 物光场偏振分量图像

Fig. 3 Polarization component image of object light field

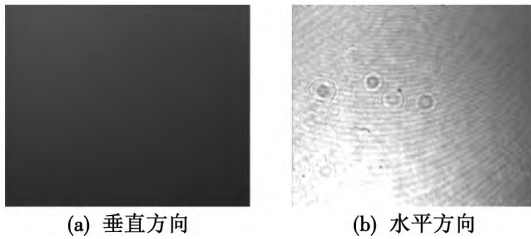


图4 参考光场偏振分量图像

Fig. 4 Polarization component image of reference light field

由第1章可知,理想情况下,物光与参考光分别为垂直和水平方向的线偏振光。不考虑光在传播中的偏振态变化,则物光在水平偏振方向应该没有光强分布,而只在垂直偏振方向有光强分布;同理参考光应该只在水平偏振方向上有光强分布。由实验结果可以看出

参考光在垂直方向没有光强分布,即参考光为水平线偏振光,与理想模型相符;但物光在水平方向和垂直方向都存在有分量,说明目标物体对物光有偏振调制,物光不是严格垂直线偏振光。此时测量得到的相位为物光相位在垂直方向上的投影,通过获取物光在两个方向的振幅以及相位信息,可以得到更多维度的信息,实现偏振成像。

为了通过同轴数字全息四步相移系统实现偏振成像,需要利用偏振元件改变参考光偏振。假设原始参考光为一束水平线偏振参考光 $R_0(x, y)$,并通过琼斯矩阵为 P_i 的相移偏振元件转换成其他偏振态的光,通过偏振元件前后光束的琼斯矩阵有如下关系

$$R(x, y) = P_i R_0(x, y) = \begin{pmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{0x}(x, y) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

把式(10)代入式(9)可得

$$R_{\alpha_i}(x, y) = \mu_i(\alpha_k) R_{0x}(x, y) \quad (11)$$

$$\mu_i(\alpha_k) = (a_i \cos \alpha_k + c_i \sin \alpha_k) \quad (12)$$

其中 $\mu_i(\alpha_k)$ 为相移参数。将式(11)代入式(7)可以得到测量光强

$$I_i(x, y, \alpha_k) = |O_x(x, y) \cos \alpha_k + O_y(x, y) \sin \alpha_k|^2 + \mu_i^2 |R_{0x}(x, y)|^2 + [\cos \alpha_k O_x(x, y) + \sin \alpha_k O_y(x, y)] R_{\alpha_i}^*(x, y) + [\cos \alpha_k O_x^*(x, y) + \sin \alpha_k O_y^*(x, y)] R_{\alpha_i}(x, y) \quad (13)$$

为方便计算,将式(13)写为矩阵形式

$$I_i(x, y, \alpha_k) = M_{i,k} O \quad (14)$$

式中 O 为光场矩阵,表明光场复振幅信息,其表达式为

$$O = \begin{pmatrix} O_x(x, y) R_{0x}^*(x, y) \\ O_y(x, y) R_{0x}^*(x, y) \\ O_x^*(x, y) R_{0x}(x, y) \\ O_y^*(x, y) R_{0x}(x, y) \\ |O_x(x, y)|^2 \\ |O_y(x, y)|^2 \\ |R_{0x}(x, y)|^2 \\ O_x(x, y) O_y^*(x, y) + O_x^*(x, y) O_y(x, y) \end{pmatrix}; \quad (15)$$

$M_{i,k}$ 为传输矩阵,由测量时的相移方式决定,其表达式为

$$M_{i,k} = \begin{pmatrix} \mu_i^*(\alpha_k) \cos \alpha_k \\ \mu_i^*(\alpha_k) \sin \alpha_k \\ \mu_i(\alpha_k) \cos \alpha_k \\ \mu_i(\alpha_k) \sin \alpha_k \\ (\sin \alpha_k)^2 \\ (\cos \alpha_k)^2 \\ \sin \alpha_k \cos \alpha_k \\ \mu_i^2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

测量时,首先调节参考光为水平线偏振光,采集得

到多幅不同偏振方向上的全息图 $I_1(x, y, \alpha_1)$, $I_1(x, y, \alpha_2)$, \dots , $I_1(x, y, \alpha_k)$; 随后在参考光路中加入相移元件 P_i , 再次采集得到多幅全息图 $I_2(x, y, \alpha_1)$, $I_2(x, y, \alpha_2)$, \dots , $I_2(x, y, \alpha_k)$. 测量得到的光强与光路中光场复振幅有如下关系

$$I = MO \tag{17}$$

式中 I 为测量矩阵, 表明测量得到的光强, 其表达式为

$$I = \begin{pmatrix} I_1(x, y, \alpha_1) \\ I_1(x, y, \alpha_2) \\ \vdots \\ I_1(x, y, \alpha_k) \\ I_2(x, y, \alpha_1) \\ \vdots \\ I_2(x, y, \alpha_k) \\ I_3(x, y, \alpha_1) \\ \vdots \\ I_i(x, y, \alpha_k) \end{pmatrix}; \tag{18}$$

M 由每次测量的相移矩阵组成, 其表达式为

$$M = (M_{1,1} \ M_{1,2} \ M_{1,3} \ \dots \ M_{i,k})^T. \tag{19}$$

对矩阵 M 求伪逆 M^+ , 可以通过测量光强 I 得到光场信息 O 为

$$O = M^+ I. \tag{20}$$

由式 (14) 和式 (20) 得到包含物光两束偏振分量的项 $O_x(x, y)$, $R_{0x}^*(x, y)$ 和 $O_y(x, y)$, $R_{0x}^*(x, y)$. 将其存储为数值矩阵, 采用数值计算方法进行重构得出数字全息的重构像. 本文采用角谱法, 算式为

$$U_x(x, y) = F^{-1}\{F\{O_x(x, y)R_{0x}^*(x, y)\}H(f_x, f_y)\} \tag{21}$$

$$U_y(x, y) = F^{-1}\{F\{O_y(x, y)R_{0x}^*(x, y)\}H(f_x, f_y)\} \tag{22}$$

其中 $U_x(x, y)$ 和 $U_y(x, y)$ 为重构所得物光复振幅的水平 and 垂直分量. 重构完成后由复振幅可计算得到物光斯托克斯矢量, 即

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_x(x, y)^2 + U_y(x, y)^2 \\ U_x(x, y)^2 - U_y(x, y)^2 \\ U_x(x, y)U_y^*(x, y) + U_x^*(x, y)U_y(x, y) \\ j(U_x(x, y)U_y^*(x, y) - U_x^*(x, y)U_y(x, y)) \end{pmatrix}. \tag{23}$$

斯托克斯矢量包含 I 、 Q 、 U 、 V 四个参量. I 为光强; Q 为 0° 与 90° 方向线偏振分量; U 为 45° 与 135° 方向线偏振分量; V 为圆偏振分量.

3 实验与结果分析

3.1 并行相移同轴数字全息偏振成像系统的搭建

系统常用的图像探测方法有两类: 1) 将工业相机作为探测器, 相机前面设置一个可旋转的线偏振片, 分别旋转线偏振片至对应角度对入射光进行检偏, 各采集 1 张图像; 2) 以偏振图像传感器作为探测器, 通过同步

相移的方法测量干涉光场不同偏振方向上的光强^[24]. 偏振图像传感器结构如图 5 所示. 传感器上每个像元表面都覆盖有像素偏振片阵列, 阵列上的微偏振器可以产生 4 个离散偏振方向 (0° , 45° , 90° , 135°). 4 个方向的微偏振器组成一个完整的探测单元, 在整个像素阵列上呈现周期性排列. 每个微偏振器在空间上与单个传感像素相匹配. 由于分时测量易受环境扰动等影响从而降低测量精度, 测量次数越多影响越大. 在使用两束参考光的情况下, 旋转偏振片需要在每个参考光下测量至少 4 个角度共 8 张图像, 而偏振图像传感器只需 2 种不同参考光下的 2 张图像. 因此本文采用偏振相机采集图像.

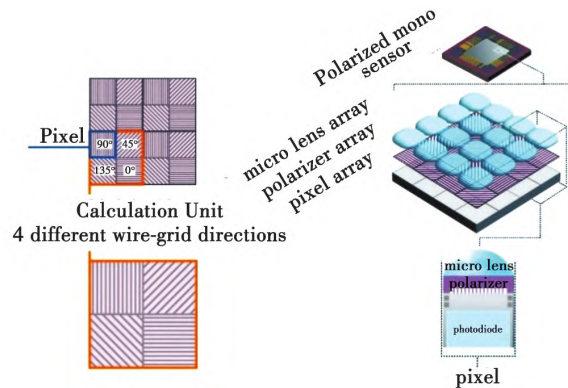


图 5 偏振传感器 IMX250 MZR 的结构示意图

Fig. 5 Structure of polarization sensor IMX250 MZR

由于本文所提出的偏振成像方法只有相移方法不同, 因此无需改变传统并行相移数字全息系统的结构, 只需改变偏振元件. 根据图 1 所示系统原理图搭建的光学实验系统如图 6 所示. 实验所用相干光源为 Thorlabs HNLO20LB 单模线偏振氦氖激光器, 功率为 2 mW, 波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 光束直径为 0.63 mm; 偏振图像传感器采用 FLIR BFS-U3-51S5P-C, 其基于 SONY IMX250MZR 偏振 CMOS 传感器, 分辨率为 2448 像素 \times 2048 像素, 像素大小为 $3.45 \mu\text{m}$, 通过 USB3.0 接口进行供电与数据传输.

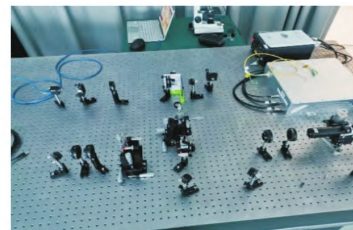


图 6 四步相移同轴数字全息的偏振成像实验系统

Fig. 6 Polarization imaging experimental system of four-step phase-shifting coaxial digital holography

3.2 分辨率板成像结果

实验所用目标物为 Thorlabs R1DS1N 1951 USAF 分辨率板. 测量时在参考光路放置 $1/4$ 波片, 旋转波片使得快轴与水平方向成 0° . 使用偏振相机对全息图进行采

集;随后旋转波片使得快轴与水平方向成 30° 再次采集,共采集得到 2 张全息图。采用平面波参考光记录并重建全息图,重建的数值衍射传播距离与目标记录距离相等,使用角谱法重建光场,采样间隔 Δx 为像素大小,即 $\Delta x = 3.45 \mu\text{m}$,重建的结果为和目标物体等大的清晰再现图像。图 7 为分辨率板的重建结果。数值重建距离为 120.30 mm 。

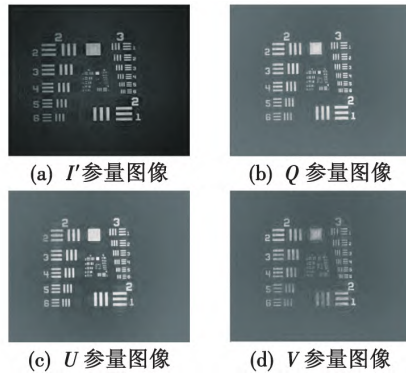


图 7 偏振成像结果

Fig. 7 Polarization imaging results

重建图像可以清晰描述分辨率板的外表,说明方法不仅可以测量光束的偏振特性,也可以通过该方法测得到偏振特性描述目标物体的外形特征,实现基于数字全息系统的偏振成像。

图 8 所示为不同图像的分辨率分析图,由图 8 可见分辨率均达到了 $22 \mu\text{m}$,其中 I 参量可分辨 6-2 元素,分辨率为 $14 \mu\text{m}$; Q 参量可分辨 5-4 元素,分辨率为 $22 \mu\text{m}$; U 参量可分辨 5-5 元素,分辨率为 $19 \mu\text{m}$; V 参量可分辨 5-4 元素,分辨率为 $22 \mu\text{m}$; I 参量分辨率最高,可能由于其本身亮度较高; V 参量分辨率较低,可能由于产生圆偏分量较少。实验验证了并行相移同轴数字全息的修正模型的正确性,证明了通过数字全息系统实现偏振成像的可行性,为实际应用建立了基础。

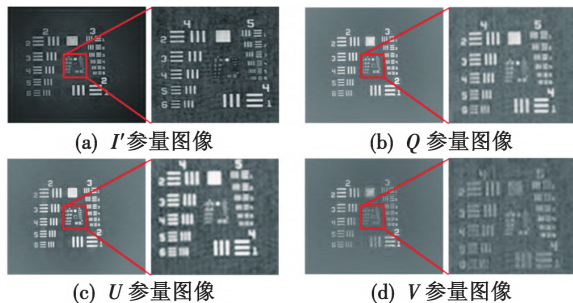


图 8 偏振成像分辨率分析

Fig. 8 Polarization imaging resolution analysis

3.3 测量误差评估分析

由上述成像结果可以看出,成像结果能描述目标表面形貌特征,基本实现偏振成像的功能。为进一步提高图像质量,针对系统中可能存在的误差进行分析。

误差可能由如下因素引起。

1) 分时测量误差。本文介绍的成像方法需要进行分时多次测量,测量过程中环境扰动等变化可能导致测量出现误差。为研究分时测量对成像效果的影响,采用旋转偏振片为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 采集 8 张图像的方式进行测量,并与上述偏振相机采集 2 张图像所得到的图进行对比,测量结果如图 9 所示。通过图像可以看出,拍摄图像张数增加时图像质量明显降低,分辨率降低至 $69 \mu\text{m}$,同时图像中出现重影现象,可能是测量时光学元件的微小移动导致。

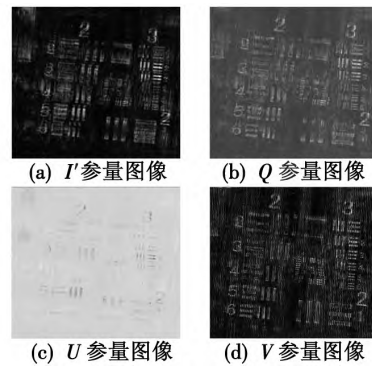


图 9 采集 8 张图像的偏振成像结果

Fig. 9 Polarization imaging results

2) 微偏振阵列误差。由于偏振相机制造工艺问题,会导致偏振阵列消光比不一致、偏振角度与实际不符等误差。为研究偏振相机中偏振阵列误差产生的影响,对实验所用偏振传感器的透过率及偏振角度进行测量,并与理想曲线比较。测量时,使用一束均匀激光通过线偏振片对偏振相机进行照射,旋转偏振片每 5° 采集一张图像,计算 4 个不同偏振角度的灰度值 $I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135}$ 作为光照强度。测量得到光强随偏振角度曲线如图 10 所示。

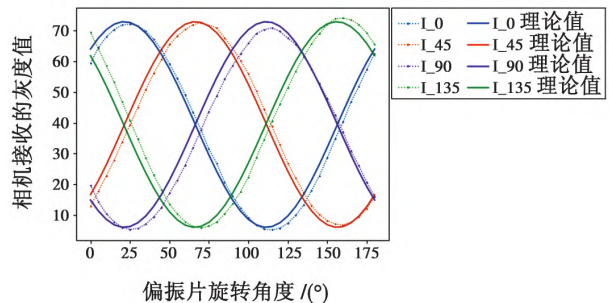


图 10 偏振图像传感器光强随角度变化测量结果

Fig. 10 Measurement results of polarization image sensor light intensity changing with angle

与理想角度比较,发现角度以及最大、最小光强的比值均存在误差,测量得到平均误差角度约为 3.5° ,平均消光比约为 84:1。偏振角度的误差以及消光比的误差将会影响算法中的参数,从而影响成像质量。

通过对误差的分析,发现不同的测量方法以及偏振相机的参数均会产生误差。若通过优化算法减少拍摄张数,并对偏振相机的误差参数进行标定,可有效提高图像分辨率,将来可以实现在微生物观测等领域的应用。

4 总结

本文开展了并行相移同轴数字全息系统的偏振成像方法的研究,提出了考虑偏振态的修正模型,依据此模型提出了并行相移同轴数字全息偏振成像方法。该方法通过物光分别与一束线偏振参考光和一束椭圆偏振参考光发生干涉,使用偏振图像传感器实现同步相移采集全息图,并使用角谱法重建得出物光在水平方向和垂直方向上复振幅分布,反演物光的斯托克斯参量,实现了偏振成像。本文验证了模型的可靠性,并搭建了使用偏振相机的数字全息偏振成像系统,实验实现了对分辨率板的斯托克斯参量成像,验证了该方法的可行性。实验表明,该方法可以对图像整体有较好的描述,实现偏振成像,完善了并行相移数字全息系统的理论模型,将系统的成像维度从相位维度扩展到偏振维度。基于数字全息的偏振成像系统有广阔的应用前景,将其应用于微生物观测等领域,可以得到微生物更多的结构及外表信息。

参考文献

- [1] GOODMAN J. Digital image formation from electronically detected holograms [J]. *Computerized Imaging Techniques*, 1967, 10(3): 176-181.
- [2] GABOR D. A new microscopic principle [J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [3] UCHNARS S, JUPTNER W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(2): 179-181.
- [4] AWATSUJI Y, SASADA M, KUBOTA T. Parallel quasi-phase-shifting digital holography [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(6): 1069-1071.
- [5] MILERD J E, BROCK N J, HAYES J B, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometer [C]//*Interferometry XII: Techniques and Analysis*. Bellingham: SPIE, 2004: 560807.
- [6] MIHOUBI S, LAPRAY P, BIGUÉ L. Survey of demosaicking methods for polarization filter array images [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3688.
- [7] 樊元朋. 水下并行相移数字全息成像系统的理论与实验研究[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) 2020.
- [8] 金川. 基于数字全息的微纳结构测量及其关键技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所) 2022.
- [9] 钱晓彤, 田爱玲, 刘丙才, 等. 基于液晶空间光调制器的相移数字全息显微测量系统精度分析 [J]. *光子学报* 2022, 51(4): 134-142.
- [10] 廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社 2003.
- [11] BEN-DOR B, OPPENHEIM U P, BALFOUR L S. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1993, 1971: 68-77.
- [12] WEI Y, HAN P L, LIU F, et al. Enhancement of underwater vision by fully exploiting the polarization information from the Stokes vector [J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 22275-22287.
- [13] 高永. 多光谱偏振信息探测系统设计与实现 [D]. 合肥: 合肥工业大学 2013.
- [14] 陈伟力, 孙秋菊, 王淑华, 等. 目标表面发射率对红外辐射偏振特性的影响分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(3): 737-742.
- [15] 李广德, 刘东青, 王义, 等. 热红外伪装技术的研究现状与进展 [J]. *红外技术* 2019, 41(6): 495-503.
- [16] 李范鸣, 牛继勇, 马利祥. 基于红外偏振特性的空间目标探测可行性探讨 [J]. *应用光学* 2013, 34(4): 653-657.
- [17] 高瑞娟, 王春华, 宁金星, 等. 基于 Mueller 矩阵的生物细胞偏振显微成像 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 391-398.
- [18] ZHAO Y Q, ZHANG L, PAN Q. Spectropolarimetric imaging for pathological analysis of skin [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(10): 236-246.
- [19] ZENG X J, LI Z, YU H, et al. Underwater image enhancement by method combined the tail-gating and active polarization imaging technology [C]//*Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications*. Bellingham: SPIE 2021: 11763.
- [20] HAN P L, LIU F, WEI Y, et al. Optical correlation assists to enhance underwater polarization imaging performance [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106256.
- [21] SHEN L H, ZHAO Y Q. Underwater image enhancement based on polarization imaging [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, XLIII-B1-2020: 579-585.
- [22] 郑淑君, 林泉, 黄志云, 等. 基于偏光全息的光场调控研究进展 [J]. *光电工程* 2022, 49(11): 220114.
- [23] 王越. 定量相位成像的偏振同步相移数字全息方法研究 [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) 2022.
- [24] SOFIANE M, PIERRE-JEAN L, LAURENT B. Survey of demosaicking methods for polarization filter array images [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3688-3697.