

引用格式: QIAN Xiaotong, TIAN Ailing, LIU Bingcai, et al. Precision Analysis of Phase Shifting Digital Holography Micromasurement System Based on LCSLM[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4):0409003

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):0409003

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

钱晓彤^{1,2},田爱玲^{1,2},刘丙才^{1,2},王红军^{1,2},牛瑞^{1,2},朱学亮^{1,2},魏翔³

(1 西安工业大学 光电工程学院,西安 710021)

(2 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室,西安 710021)

(3 西安交通大学 苏州研究院,江苏 苏州 215100)

摘 要:液晶空间光调制器的空间不均匀性和边缘场效应导致调制后相位存在畸变,为提高基于液晶空间光调制器的相移数字全息显微系统的测量精度,提出了二次相位标定相移数字全息的测量方法。首先,基于斐索干涉系统,以反射式液晶空间光调制器为被测对象,对其灰度与相移量的关系进行一次标定,并测量畸变波前相位;然后,利用二维图像插值算法及灰度化算法,设计出与液晶空间光调制器分辨率相等的畸变相位共轭灰度图;最后,将共轭灰度图加载在液晶空间光调制器上,获得理想调制相位,达到二次相位标定的目的。构建基于液晶空间光调制器的相移数字全息显微测量系统,对微透镜阵列进行测量实验,结果表明:二次标定前后微透镜阵列纵向矢高的相对测量误差由 3.08% 减少到 1.15%,证明该方法能够有效提高相移数字全息的测量精度。

关键词:数字全息;相移;液晶空间光调制器;标定;相位重建;三维测量

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225104.0409003

0 引言

数字全息技术^[1]具有全场、无接触、快速测量三维物体等特点,已广泛应用于三维显示^[2-3]、无损检测^[4-5]、生物测试^[6-7]等多个领域。数字全息技术可分为离轴和同轴两种记录方式,前者能够有效消除共轭像与零级像的干扰,但受限于记录器件分辨率与靶面尺寸的大小;后者记录时物参光夹角为零,记录器件的空间带宽积利用率高,但不能分离共轭像与零级像。若在同轴数字全息中引入相移技术^[8-10]使重建像与干扰像分离,可重建出分辨率更高、噪声更低的再现像,提高数字全息的三维测量精度。因此,针对相移数字全息测量系统的研究具有重要的工程应用价值。

由于传统机械移动的相移方法在测量过程中会不可避免地引入随机误差及系统误差,因此为提高相移数字全息的三维重建精度,有学者提出利用液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LCSLM)的相位调制特性实现无机械移动相移数字全息^[11]。然而 LCSLM 的相位调制精度受多种因素影响,在高精度测量领域有必要在应用前对其进行相位标定。中国科学院光电技术研究所白福忠等^[12]为提高 LCSLM 波前调制精度,通过泰曼格林干涉仪测量 LCSLM 的相移特性,改进马赫泽德装置,对 LCSLM 内部反射硅基板引入的相位误差进行标定,将波前像差的 PV 值从 0.39 λ 降低到 0.23 λ ,RMS 值从 0.08 λ 降低到 0.03 λ 。在三维显示领域 LCSLM 常应用于模拟波前,哈尔滨理工大学张洪鑫等^[13]为提高其波前模拟精度,

基金项目:基础科研项目(No. JCKY2018426C002),陕西省科技厅项目(No. 2019KW-016),苏州市重点产业技术创新项目(No. SYG201922)

第一作者:钱晓彤(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为数字全息测量技术。Email: 958291629@qq.com

导师(通讯作者):田爱玲(1964—),女,教授,博士,主要研究方向为光学检测、光电测量和光学制造等。Email: ailintian@xatu.edu.cn

收稿日期:2021-08-31;**录用日期:**2021-11-19

<http://www.photon.ac.cn>

建立 LCSLM 为波前发生器的波前模拟系统,产生 RMS 值为 0.265λ 的模拟误差,利用斐索干涉系统对 LCSLM 的波前模拟误差进行标定,标定后 RMS 值减小到 0.223λ 。以上研究都未提及标定过程中 LCSLM 像素不匹配的问题,然而 LCSLM 中每一个像素由一个独立液晶^[14-16]控制,若像素不匹配则无法对独立液晶产生的相位进行标定,会降低 LCSLM 的相位调制精度,同时也会使 LCSLM 调制的相移量存在误差。因此,本文通过每个液晶单元的灰度值调节,修正整体畸变相位,从而消除 LCSLM 的边缘效应和空间不均匀性,并将其应用在相移数字全息实现高精度测量。

本文展开了基于 LCSLM 相移数字全息的二次相位标定理论研究,利用斐索干涉测量系统,根据具体实验要求对其相位调制特性进行一次标定,测量了 LCSLM 的灰度-相位调制曲线,然后测量经 LCSLM 调制后产生的畸变相位,并通过设计相位共轭灰度图实现 LCSLM 的二次相位标定,所提出方法降低了测量复杂度。以马赫泽德干涉为原型,设计基于 LCSLM 的相移数字全息测量装置,对透射式物体微透镜阵列进行相应的实验测试与误差分析。

1 基本原理

1.1 基于 LCSLM 的相移数字全息

相移数字全息将相移干涉技术与数字全息技术相结合,基本原理是:位于物面的被记录物体所射出的物光与被相移装置控制的参考光在全息面发生干涉,全息图被位于全息面的 CCD 记录,以数字矩阵的形式保存在计算机中,利用计算机软件及相移重建算法进行模拟再现,从而得到原物体的清晰像。

由于反射型 LCSLM 的液晶层厚度为透射型的一半,响应速度快、分辨率高,因此,将反射型 LCSLM 作为相移数字全息系统的相移器件调制相位,测量原理如图 1。激光器经过显微物镜(MO₁)和会聚透镜(L)组成的扩束准直系统(BE)后,由反射镜 M₁ 转向入射到分光棱镜(BS₁)1:1 分成两路光束,透射光为物光路(O),反射光为参考光路(R)。物光透过物体并由 MO₂ 放大,入射到 BS₃ 上;参考光经 BS₂ 透过偏振片 P,垂直入射 LCSLM,经其反射后再次通过 P,入射至 BS₂ 转向,由 MO₃ 放大后入射到 BS₃ 上。参考光和物光经 BS₃ 合束后发生全息干涉,通过 CCD 相机记录全息图。

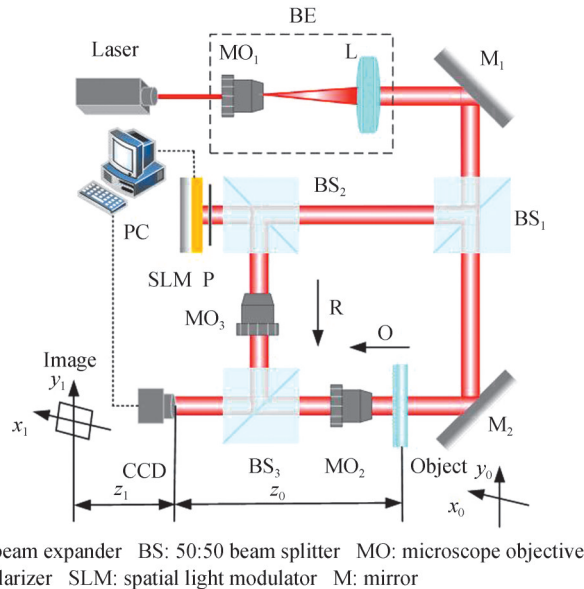


图 1 基于 LCSLM 的相移数字全息原理示意

Fig. 1 Schematic of phase-shift digital holography of reflective LCSLM

设被记录物体位于 x_0y_0 平面, CCD 记录面位于 xy 平面,再现像位于 x_1y_1 平面, CCD 记录面距离物平面 z_0 , 距离再现像平面 z_1 。CCD 记录的相移全息图干涉强度分布可表示为

$$I(x, y, \delta_m) = A_o(x, y)^2 + A_r(x, y)^2 + 2A_oA_r \cos(\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y) + \delta_m) \quad (1)$$

式中, $A_o(x, y)$ 和 $A_r(x, y)$ 分别为物波和参考波的振幅分布; $\varphi_o(x, y)$ 和 $\varphi_r(x, y)$ 分别为物波和参考波的相位分布; δ_m 为 LCSLM 第 m 次改变灰度在全息记录中引入的相移量。

在记录的全息图中, 物体的零级谱、+1 级谱和 -1 级谱在频谱域重叠影响再现像的质量, 本文采用四步相移技术去除零级谱和 -1 级谱, 获得物光波的复振幅分布进行再现。

四步相移技术要求记录四幅不同的干涉图, 在参考光路中引入步长分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的相移量, 通过式(1)可得记录面上物光波的复振幅分布为

$$U(x, y) = \frac{1}{4A_r(x, y)} \left[(I_1 - I_3) + i(I_2 - I_4) \right] \quad (2)$$

式中, I_1, I_2, I_3, I_4 分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 相移全息图的干涉强度分布。

计算机数字模拟产生参考光波, 利用角谱再现法得到的成像面上复振幅的表达式为

$$U(x, y, z_1) = \iint_{-\infty}^{+\infty} G_z(f_x, f_y) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (\lambda f_x x + \lambda f_y y) \right] df_x df_y \quad (3)$$

式中, z_1 为衍射距离, λ 为波长, $G_z(f_x, f_y)$ 为物光波 $U(x, y)$ 的衍射光波在像平面的频谱。由式(3)可得到相应的再现相位分布

$$\varphi = \arctan \frac{\text{Im}[U(x, y, z_1)]}{\text{Re}[U(x, y, z_1)]} \quad (4)$$

式中, Im 与 Re 分别表示复振幅的虚部和实部。由于求解相位时使用了反正切函数, 其主值域为 $(-\pi, \pi]$, 因此, 所求相位被限定在 $(-\pi, \pi]$ 内, 直接计算得到的相位被包裹。对式(4)采用最小二乘相位解包裹算法^[17], 得到待测物体真实的相位分布, 同时消除数字参考光对再现光的影响^[18]。

1.2 二次相位标定

LCSLM 存在边缘效应及空间不均匀性的问题, 导致 LCSLM 中每一个液晶产生的相移量存在一定的误差, 光波经其调制后会产生畸变波前相位。二次相位标定方法是利用 LCSLM 的灰度响应特性及光学相位共轭原理, 对 LCSLM 进行相位畸变校正。

根据波前相位共轭补偿原理: LCSLM 中由灰度控制各个液晶进行相位调制, 一束光经其调制后产生畸变相位, 设计与畸变相位共轭的灰度图, 当光通过共轭灰度图控制的 LCSLM 后相位畸变被抵消, 光束恢复到无畸变的理想状态。

设实际畸变波前的复振幅分布表示为

$$I(i, j) = A(i, j) \exp \left[i\delta_{\text{real}}(i, j) \right] \quad (5)$$

式中, A 和 δ 为畸变波前的振幅及相位, (i, j) 为空间坐标。

共轭畸变波前的复振幅分布可表示为

$$I^*(i, j) = A(i, j) \exp \left[-i\delta_{\text{real}}(i, j) \right] = A(i, j) \exp \left[i\phi(i, j) \right] \quad (6)$$

式中, $*$ 为共轭; $\phi(i, j)$ 为共轭波前相位, 且 $\phi(i, j) = -\delta_{\text{real}}(i, j)$ 。

利用 Zygo 干涉仪测量畸变波前的相位数据, 由于干涉仪测量范围大于 LCSLM 靶面, 因此相位数据中被测面以外的无效数据被赋予 0 值, 提取 $i \text{ pixel} \times j \text{ pixel}$ 大小被测面的相位信息 $\delta_{\text{real}}(i, j)$ 。然后对数据进行预处理得到共轭相位, 可表示为

$$\phi(i, j) = \max \left[\delta_{\text{real}}(i, j) - \min(\delta_{\text{real}}(i, j)) \right] - \left[\delta_{\text{real}}(i, j) - \min(\delta_{\text{real}}(i, j)) \right] \quad (7)$$

式中, max 和 min 表示取最大、最小相位值的平面。

再通过程序编码为共轭灰度图 $g_s(i, j)$, 可表示为

$$g_s(i, j) = f \left[\phi(i, j) \right] \quad (8)$$

式中, s 为灰度值; f 为灰度-相位数据转换函数。

由于存在 LCSLM 与干涉仪中 CCD 分辨率不匹配的问题, 为保证编码出与 LCSLM 分辨率 $x \text{ pixel} \times y$

pixel大小相等的灰度图,对 $g_s(i, j)$ 进行二维线性插值, x 方向每隔 $\frac{i-1}{x-1}$ 插值1个数据, y 方向每隔 $\frac{j-1}{y-1}$ 插值1个数据,得到与LCSLM分辨率相等的共轭灰度图,可表示为

$$g_s(x, y) = [(j+1)-y][(i+1)-x]g(i, j) + [(j+1)-y](x-i)g(i+1, j) + (y-j)[(i+1)-x]g(i, j+1) + (y-j)(x-i)g(i+1, j+1) \quad (9)$$

将式(9)中的共轭灰度图加载在LCSLM上调节每个液晶灰度值,即可达到修正整体畸变相位的效果,提高LCSLM的相位调制精度。

2 实验结果与讨论

2.1 LCSLM二次标定补偿实验及分析

实验测量系统如图2,采用的斐索干涉仪为美国Zygo公司的VeriFire PE干涉仪,该激光干涉仪能够提供常规及高精度的光学表面面型测量,可同时获得LCSLM整个液晶靶面上的相位分布情况。根据实验原理搭建光路,干涉仪发出波长为632.8 nm的He-Ne激光被干涉仪内的标准平面镜即参考镜分为两部分光,一部分经平面镜反射到干涉仪内部作为参考光,一部分透过平面镜由衰减片降低光强后,经偏振片调制为线偏振光,被LCSLM反射回来的光为物光,物光和参考光发生共路干涉,由干涉仪内部CCD采集干涉条纹图,通过PC₁中干涉仪分析软件得到对应面型的各种测量结果,PC₂用来控制向LCSLM输入灰度图。

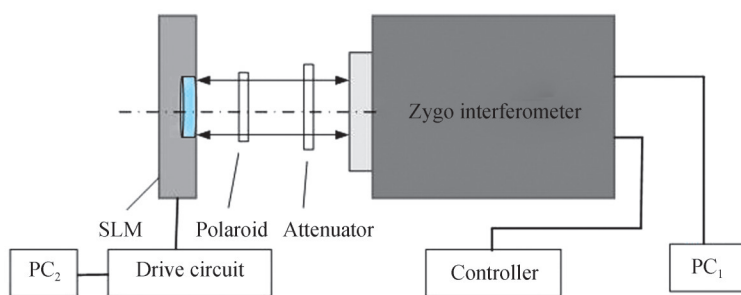


图2 二次标定补偿实验原理

Fig. 2 Schematic of secondary phase calibration experiment

本文选用的LCSLM分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$,像素大小为 $8 \mu\text{m}$ 。实验装置中使用的激光为非偏振光,使通过偏振片后的线偏振光振动方向与LCSLM液晶长轴方向一致,可实现LCSLM的纯相位调制,以达到最佳调制精度。

根据基于斐索干涉的LCSLM相位调制曲线测量方法^[19],测量得到本实验中的LCSLM加载255灰度图时对应的相移量为 0.998λ ,相位的最大调制范围为 1.996π ,相位调制曲线如图3。可得相移量 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 所对应加载的灰度值分别为0、68、137、191。

基于1.2节所述二次相位标定方法,由图2实验原理测量得到LCSLM标定前后波前相位的测量结果,如图4所示,其中图4(a)为0、68、137、191灰度标定后LCSLM的三维相位分布;图4(b)、(c)给出0灰度标定前后LCSLM的三维相位分布;为便于直观比较,图4(d)、(e)给出0灰度标定前后LCSLM的三维相位分布的截面线进行比较。

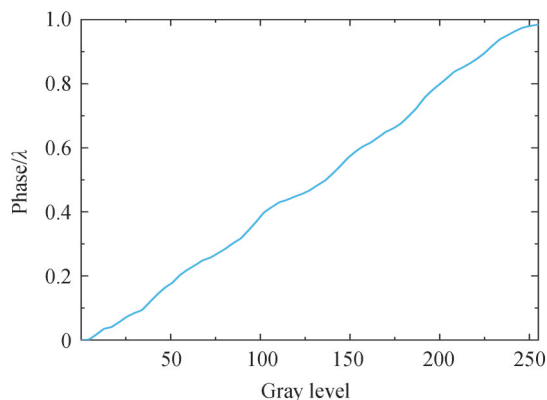


图3 LCSLM相位调制曲线

Fig. 3 LCSLM phase modulation curve

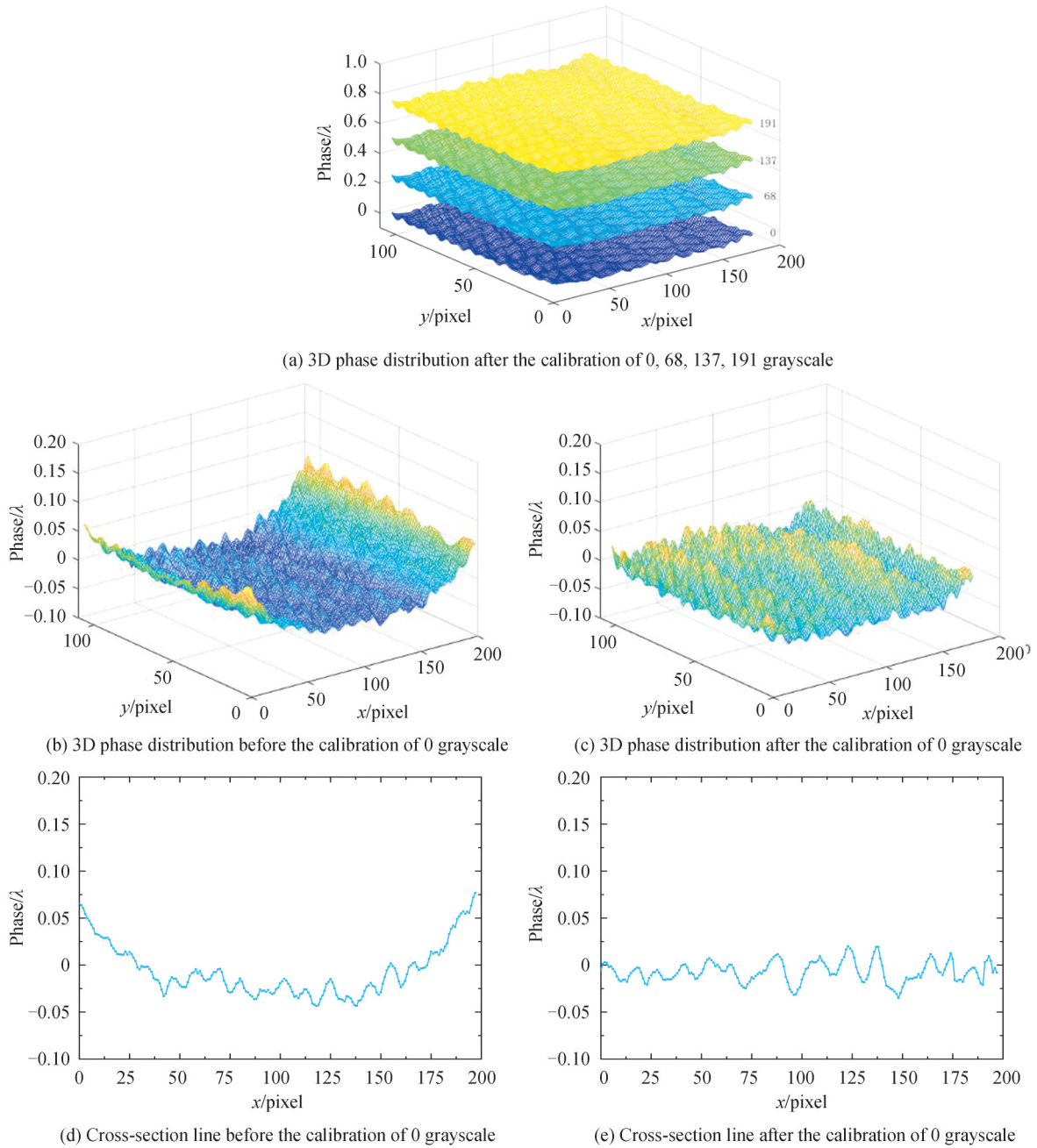


图 4 LCSLM 二次相位标定结果
Fig. 4 LCSLM secondary phase calibration results

由图 4 可知, LCSLM 中每一个像素对应的液晶分子调制相位时存在偏差, 导致调制后的反射光产生畸变, 降低 LCSLM 的相位调制精度。图 4(b)、(d) 中可看出二次标定前经 LCSLM 调制后的波面呈现两边高中间低的趋势; 图 4(c)、(e) 中可看出二次标定后经 LCSLM 调制后的波面呈现理想平面的趋势, 相位具有起伏的状态, 造成这种起伏的原因是 LCSLM 自身像素间串扰产生的误差, 此种误差对测量精度影响较小。将标定前后相位波面的峰谷差值(Peak-Valley, PV)和均方根值(Root-Mean-Square, RMS)作为评价指标, 实验结果的评价参数, 如表 1。

表 1 标定实验结果分析
Table 1 Analysis of calibration experiment results

Evaluation indicator	PV	RMS
Before	0.182λ	0.039λ
After	0.088λ	0.022λ

通过分析表1数据可得,二次相位标定方法可减少液晶间相位调制误差,使得波前相差的PV值由 0.182λ 减小到 0.088λ ,RMS值由 0.039λ 减小到 0.022λ 。实验结果表明,利用二次相位标定的方法进行补偿后,其整体的液晶面调制效果更趋近于理想值,证明该方法可有效提升LCSLM的相位调制精度。

2.2 LCSLM二次相位标定相移数字全息实验及分析

为验证LCSLM二次相位标定后应用于相移数字全息测量精度提升的有效性。根据马赫泽德干涉光路,设计并构建透射式相移数字全息显微测量装置,如图5。系统中使用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器作为光源,入射至偏振片后,经过 $50\times$ 显微物镜和透镜组成的扩束准直系统,经分光棱镜1分成两路光束,透射光为物光路(O),反射光为参考光路(R)。物光波透过矢高为 $2.6\text{ }\mu\text{m}$ 的微透镜阵列,并用 $10\times$ 显微物镜放大,入射到分光棱镜3上;参考光波经分光棱镜2垂直入射LCSLM,反射后由分光棱镜2转向,由 $10\times$ 显微物镜放大后入射到分光棱镜3上。参考光和物光经过分光棱镜3合束后发生全息干涉,通过CCD相机记录全息图。

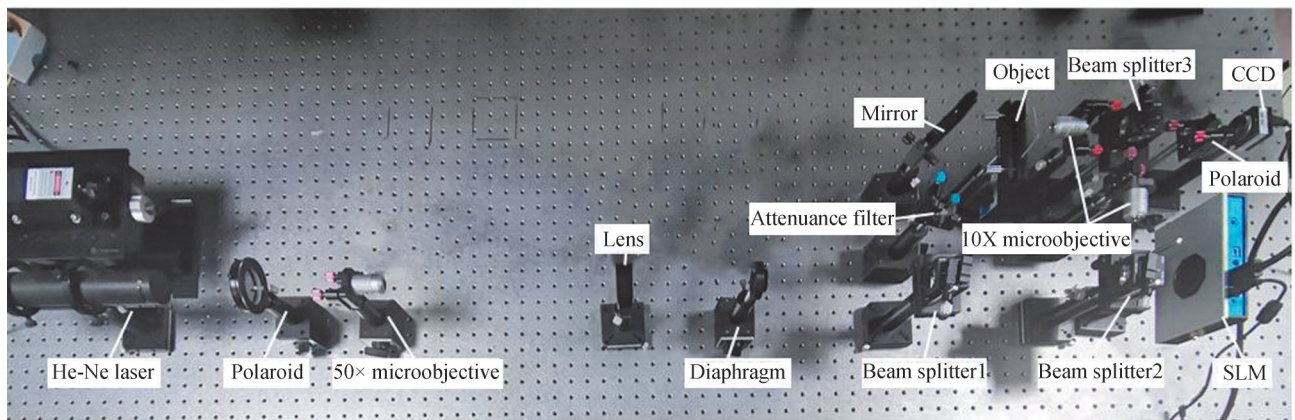
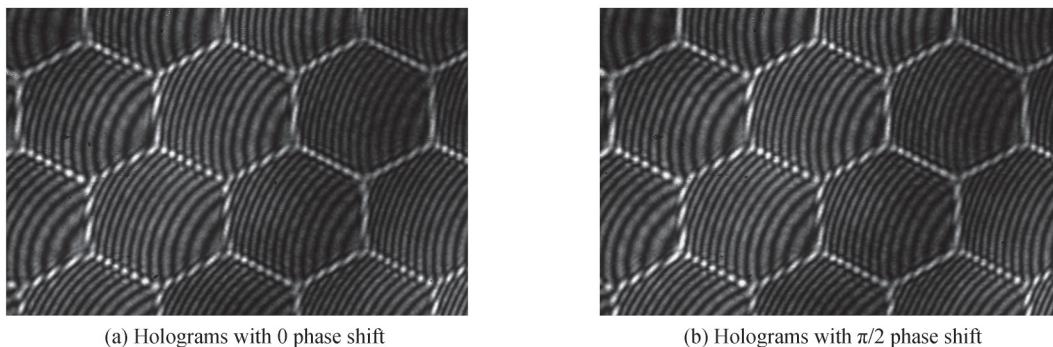


图5 LCSLM的相移数字全息实验装置

Fig. 5 Experimental setup of phase-shifting digital holography based on reflection LCSLM

由2.1节实验获得灰度值为0、68、137、191标定后的灰度图。首先,将标定后的灰度图转换为8bit数字二进制编码信号分别加载到LCSLM中,改变参考光路中的相位差,采集微透镜阵列的相移数字全息图,如图6(a)~(d);然后,为去除数字全息中零级像与共轭像的干扰采用四步相移算法及再现算法处理全息图,得到微透镜阵列的包裹相位分布,如图6(e);其次,利用最小二乘算法对相位进行解包裹得到连续的真实相位分布,如图6(f);最后,由于实验系统中各个光学元件会引入相位畸变,因此需要对再现像进行畸变校正,获得准确的被测件相位分布,利用相位畸变补偿算法消除系统误差引起的相位畸变,得到微透镜阵列的二维相位图及三维相位图,如图6(g)、(h)。

为验证LCSLM二次相位标定后的效果,给LCSLM上加载标定前的灰度图,采集四幅全息干涉图,利用上述再现方法得到标定前的重建相位图。为便于直观比较,将标定前重建相位图的截面线与图6(g)中标定后重建相位图截面线对比,如图7所示。



(a) Holograms with 0 phase shift

(b) Holograms with $\pi/2$ phase shift

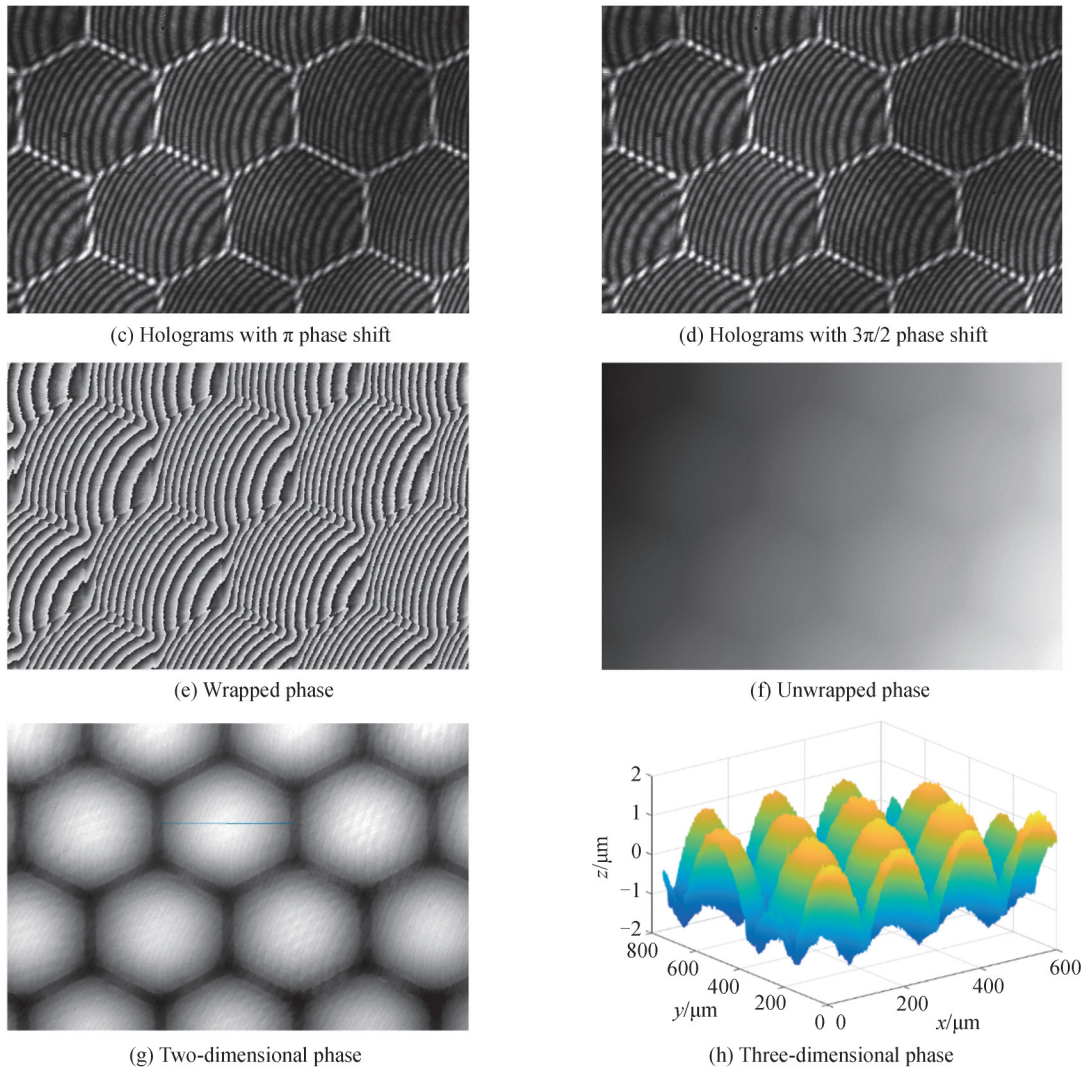


图6 LCSLM二次标定后相移数字全息实验结果

Fig. 6 LCSLM secondary calibration after phase shift digital holographic experiment results

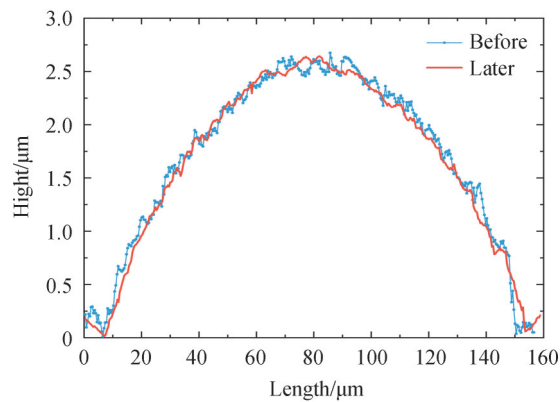


图7 标定前后截面线对比分析结果

Fig. 7 Comparative analysis result before and after calibration

由图7可见, LCSLM二次相位标定前与标定后测量结果形貌较为吻合,在不使用额外噪声滤波的情况下,标定前测量波面的锯齿状起伏较大,标定后的测量波面较为平滑,恢复的相位精度更高。实际测量标定前微透镜阵列的纵向矢高为 $2.68 \mu\text{m}$,得到矢高的相对误差为 3.08% ;标定后微透镜阵列的矢高为 $2.63 \mu\text{m}$,得到矢高的相对误差为 1.15% ,由此可知,相移数字全息系统中将二次相位标定后 LCSLM 作为相移器可提

高测量精度。

3 结论

本文研究了反射式空间光调制器二次相位标定的方法并将其应用于相移数字全息中,基于斐索干涉系统,测量反射式LCSLM畸变波前的相位;计算获得共轭相位,利用二维图像插值算法及灰度化算法,编码设计出与LCSLM分辨率相等的灰度图;加载在LCSLM上实现了等灰度调制误差的二次标定。实验结果表明,通过测量LCSLM的相位调制曲线和畸变波前相位,经标定后波前相差的PV值减小到 0.088λ ,RMS值减小到 0.022λ 。将标定后的LCSLM应用于相移数字全息测量系统中,得到微透镜阵列列高的相对误差减小到1.15%。由此可见,在干涉测量装置中使用液晶器件,可以控制相位重建的精度,标定后的LCSLM具有较强的波前控制能力,获得了显著改善的相位图像。相比于传统机械移动的相移测量技术,此技术操作方便、装置简单,只需控制LCSLM来改变加载的图案,数据采集更加快速,降低了对环境等实验条件的要求。可应用于形变分析、微纳器件三维测量等领域,因此该技术具有很好的研究价值和应用前景。

参考文献

- [1] GABOR D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098):777-778.
- [2] KREIS T. Applications of digital holography: From microscopy to 3D-television [J]. Journal of the European Optical Society: Rapid Publications, 2012, 7: 1009002.
- [3] LIU Zimo, YAO Jianyun, XU Fuyang, et al. Computer integrated color rainbow holographic 3D display[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10):1009002.
刘子陌,姚建云,许富洋,等.计算机集成彩色彩虹全息3D显示[J].光学学报,2021,41(10):1009002.
- [4] COLOMB T, KRIVÉC S, HUTTER H, et al. Digital holographic reflectometry[J]. Optics Express, 2010, 18(4):3719-3731.
- [5] FENG Fang, TIAN Ailing, LIU Bingcai, et al. Full-field three-dimensional test for scratch defects using digital holographic scanning imaging system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0409003.
冯方,田爱玲,刘丙才,等.基于数字全息扫描成像的划痕缺陷全场三维测试[J].中国激光,2020,47(4):0409003.
- [6] XIAO Wen, LI Jie, PAN Feng, et al. Super-resolution in digital holographic phase cell image based on USENet[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(6): 0610001.
肖文,李解,潘锋,等.基于USENet实现数字全息细胞再现相位像超分辨重构[J].光子学报,2020,49(6):0610001.
- [7] ZONG Haotian, ZHANG Haiyun, WANG Famin, et al. Large field of view line scan confocal holographic microscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(1):1-9.
纵浩天,张海运,王发民,等.大视场线扫描共聚焦全息显微成像[J].光学精密工程,2021,29(1):1-9.
- [8] GUO Jun, WANG Gang, SUN Jie, et al. Three-dimensional deformation measurement by four-step digital phase-shifting holographic interferometry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12):2808-2813.
郭俊,王刚,孙杰,等.四步数字相移全息干涉术三维变形测量[J].仪器仪表学报,2011,32(12):2808-2813.
- [9] PENG X A, SR A, TIB C, et al. Dynamic phase measurement of a transparent object by parallel phase-shifting digital holography with dual polarization imaging cameras[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 141:106583.
- [10] XIA P, WANG Q, RI S. Random phase-shifting digital holography based on a self-calibrated system[J]. Optics Express, 2020, 28(14):19988-19996.
- [11] SHI Xia, ZHU Wufeng, YUAN Bin, et al. Experimental study of the incoherent digital holography[J]. Chinese Journal of Laser, 2015, 45(12):265-269.
石侠,朱五凤,袁斌,等.非相干光照明数字全息实验研究[J].中国激光,2015,45(12):265-269.
- [12] BAI Fuzhong, RAO Changhui. Phase shift characteristic measurement and static distortion compensation for liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 487-1491.
白福忠,饶长辉.液晶空间光调制器相移特性测量与静态畸变补偿[J].光学学报,2010,30(5):1487-1491.
- [13] ZHANG Hongxin, ZHANG Jian, QIAO Yujing, et al. Wavefront generation and error compensation by liquid crystal spatial light modulator[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2013, 24(5):838-842.
张洪鑫,张健,乔玉晶,等.液晶空间光调制器波前模拟及误差补偿[J].光电子激光,2013,24(5):838-842.
- [14] DU Shengping, FU Chengyu, HUANG Yongmei, et al. A method of measure the liquid-crystal's modulating characteristic[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(1): 0105001.
杜升平,傅承毓,黄永梅,等.一种液晶相位调制特性的测量方法[J].光子学报,2017,46(1):0105001.
- [15] INLII K, MUHAMMAD A A, MUHAMMAD Q M, et al. Customized depolarization spatial patterns with dynamic retardance functions[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1):9145-9145.
- [16] LI Dahai, CHEN Huaixin, CHEN Zhenpei. Utilizing LCTV's phase modulation characteristics to compensate distorted wavefront[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(7): 614-618.
李大海,陈怀新,陈祯培.利用液晶电视的位相调制特性补偿畸变波前[J].中国激光,2003,30(7):614-618.

- [17] GUO Yuan, CHEN Xiaotian. Study of improved phase unwrapping algorithm based on least squares[J]. Chinese Journal of Laser, 2014,41(5):195-200.
郭媛, 陈小天, 基于最小二乘相位解包裹改进算法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(5):195-200.
- [18] FERRARO P, NICOLA S D, 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.
- [19] CHEN Kehan, WANG Jiake, HE Wenjun. Correction for the phase modulation accuracy of liquid crystal on silicon based spatial light modulator[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020, 43(2): 20-26.
陈柯含, 王加科, 贺文俊. 液晶空间光调制器相位调制精度的校正[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(2): 20-26.

Precision Analysis of Phase Shifting Digital Holography Micromasurement System Based on LCSLM

QIAN Xiaotong^{1,2}, TIAN Ailing^{1,2}, LIU Bingcai^{1,2}, WANG Hongjun^{1,2}, NIU Rui^{1,2},
ZHU Xueliang^{1,2}, WEI Xiang³

(1 School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(2 Shaanxi Province key laboratory of Membrane technology and Optical test, Xi'an 710021, China)

(3 Suzhou Academy, Xi'an Jiaotong University, Suzhou, Jiangsu 215100, China)

Abstract: The phase shift digital holographic micromasurement system based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator (LCSLM) is simple and easy to operate. However, LCSLM has problems of spatial inhomogeneity and edge field effect, resulting in phase distortion after modulation. To improve the measurement accuracy of phase shift digital holographic microscopy system based on LCSLM, a method of phase shift digital holographic measurement with secondary phase calibration is proposed in this paper. Firstly, based on the Fizeau interferometric system, the relationship between the gray level and the phase shift of the reflection LCSLM was calibrated once, and the phase of the distorted wavefront was measured. Then, two dimensional image interpolation algorithm and grayscale algorithm are used to design distorted phase conjugated grayscale image with the same resolution as LCSLM. Finally, the conjugated grayscale map is loaded on the LCSLM to obtain the ideal modulation phase, and the purpose of the second phase calibration is achieved. The experimental results show that after the second phase calibration, the PV value of LCSLM wavefront difference decreases from 0.182λ to 0.088λ , and the RMS value decreases from 0.039λ to 0.022λ . The overall liquid crystal surface modulation effect is more close to the ideal value, which proves that the proposed method can effectively improve the phase modulation accuracy of LCSLM. The phase shift digital holography micromasurement system based on LCSLM was constructed, and the measurement experiment of the microlens array was carried out. The results show that under the condition of without using additional noise filtering, calibration before measuring wave of serrated fluctuation, calibration of measuring wave is relatively smooth, the micro lens array longitudinal secondary calibration rise of relative measurement error reduced to 1.15% from 3.08%, which proves that the method can effectively improve the accuracy of measurement of phase shift digital hologram. It can be seen that the precision of phase reconstruction can be controlled by using liquid crystal devices in the interferometry device, and the calibrated LCSLM has strong wave-front control ability, and significantly improved phase images can be obtained. Compared with the traditional mechanical moving phase shift measurement technology, this technology has convenient operation and simple device. Only LCSLM is controlled to change the loading pattern, and data acquisition is faster, reducing the requirements for environmental and other experimental conditions. It can be applied to deformation analysis and 3D measurement of micro-nano devices, so it has good research value and application prospect.

Key words: Digital holography; Phase shift; Liquid crystal spatial light modulator; Three-dimensional measurement; Phase reconstruction; Calibration

OCIS Codes: 090.1995; 050.5080; 070.6120; 120.5060