

文章编号: 1001-3806(2017)04-0515-06

结合高位深相位光栅图的 LC-SLM 标定

徐 豪^{1,2}, 张运海^{1*}, 张 欣¹, 肖 昀¹, 黄 维¹

(1. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所 江苏省医用光学重点实验室, 苏州 215163; 2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 为了提高对液晶空间光调制器(LC-SLM)的校准精度,采用高位深相位光栅图对 LC-SLM 进行了标定。在 LC-SLM 上加载 16 位深度相位光栅图,并使光束经 LC-SLM 调制后生成衍射光斑;测量衍射光斑中心光强,经过计算分析得出计算机灰度信号与相位调制量之间的映射关系,最终得出针对 488nm 激光的 LC-SLM 标定 LUT 文件(LUT16)。结果表明,在 LC-SLM 上加载 $0 \sim 2\pi$ 涡旋相位,并结合 LUT16 文件调制光束可以得到光斑质量很好的中空光斑,这与结合 LUT8 文件调制的中空光斑相比,光斑质量从 0.53 提高到 0.76,提高了 1.43 倍。针对特定波长,利用高位深相位光栅图标定 LC-SLM 得到的 LUT 文件可以使 LC-SLM 根据加载相位对光束进行有效调制,且调制效果优于结合 LUT8 对光束进行调制的结果,对 LC-SLM 的校准精度得到提高。

关键词: 光学器件; 液晶空间光调制器; 校准精度; 相位光栅图; 傅里叶光学

中图分类号: O436.1; O753. +2 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.04.012

Calibration of LC-SLM with high bit depth phase gratings

XU Hao^{1,2}, ZHANG Yunhai¹, ZHANG Xin¹, XIAO Yun¹, HUANG Wei¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China; 2. College of Material Science and Photoelectric Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve calibration accuracy of liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM), high bit depth phase gratings were proposed. Firstly, 16bit phase grating patterns were presented on LC-SLM, and diffraction spot was generated after the modulation of LC-SLM, the intensity of the diffracted spot was measured. Through calculation and analysis, the mapping relationship between gray level signal and phase modulation was obtained. Finally, calibration LUT file (LUT16) of LC-SLM for 488nm laser was obtained. The experimental results suggest that, hollow spot of good quality can be obtained when $0 \sim 2\pi$ vortex phase and LUT16 are presented on LC-SLM. Compared with LUT8, spot quality of LUT16 is improved 1.43 times of LUT8 from 0.53 to 0.76. The results show that aiming at specific wavelength, LUT file can be obtained by calibration of LC-SLM by means of high bit deep phase gratings and that beam can be modulated effectively by LC-SLM according to the loading phase. Modulation effect is better than that of LUT8 and calibration accuracy of LC-SLM is improved.

Key words: optical devices; liquid crystal spatial light modulator; calibration accuracy; phase grating; Fourier optics

引 言

液晶空间光调制器(liquid crystal spatial light modulator, LC-SLM)是一种利用液晶的电光效应对光波相位进行连续调制的器件^[1]。在光信息处理系统中,LC-SLM 具有能耗低、空间分辨率高、调制速度快、无机械惰性、可编程控制等优点,在光学相关领域中有广

泛的应用^[2-3]。当不同波长的光束射入 LC-SLM 时,液晶分子的双折射效应不同,LC-SLM 对入射光束的相位调制特性不同。因此,在光学实验系统中,要对特定波长的光束进行 LC-SLM 的标定^[4]。

关于 LC-SLM 的标定方法已经得到了广泛的研究。泰曼-格林干涉法是一种利用光的干涉现象对 LC-SLM 的相位调制特性进行测量的方法。这种方法利用分光棱镜将激光器发出的激光分为两路,一路经过反射镜平面反射,一路经过 LC-SLM 平面反射。这两路反射光相遇发生干涉,并在探测 CCD 中成像。在 LC-SLM 中加载不同灰度值的图像时,CCD 中干涉条纹会发生移动。记录干涉条纹的移动量,并利用算法得到相位调制量与灰度级之间的关系^[5-6]。通过理论

基金项目:国家重大科研装备研制资助项目(ZDYZ2013-1);江苏省六大人才高峰资助项目(2012-swyy-020)

作者简介:徐 豪(1990-),男,硕士研究生,主要从事光学显微镜方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhangyh@sibet.ac.cn

收稿日期:2016-07-27;收到修改稿日期:2016-08-30

与实验证实,泰曼-格林干涉法可以很好地测量 LC-SLM 的相位调制特性。然而,泰曼-格林干涉法的实验光路系统比较复杂,而且对后期的数据处理也比较繁琐。双缝干涉法也是一种对 LC-SLM 的相位调制特性进行测量的方法。双缝干涉法的主要组成部分是两组双缝,其中一组双缝为通过 LC-SLM 来模拟,狭缝被分为两半,一半有相位变化,另一半没有相位变化,作为测试组;而另一组实际双缝作为参考组,无相位差。这样就会产生两组干涉条纹。改变相位缝的差值,干涉条纹会产生相对移动,从而可以确定灰度值和相位之间的关系^[7]。由于双缝干涉是基于参考组进行的,一次测量只能反映测试缝上的相位调制情况,无法客观反映整个 LC-SLM 的相位调制特性。除了上述空间光调制器标定方法之外,还有径向剪切干涉、横向剪切干涉、马赫-曾德尔干涉法。但是这几种方法只适用于透射式液晶空间光调制器的测量^[8-11]。

根据夫琅禾费近似条件下光的远场分布与出射光场分布呈傅里叶变换关系,本文中提出了针对 488nm 波长激光的高精度 LC-SLM 标定方法,搭建了实验光路系统,并在 LC-SLM 上加载 16 位深度相位光栅图,光束经 LC-SLM 调制,探测 CCD 接收衍射光斑。测量衍射光斑中心光强,计算出相位调制量,进而得到计算机灰度信号与相位调制量之间的对应关系,制作查找表(look-up-table, LUT)文件。本文中提出的 LC-SLM 标定方法,其实验光路系统简单、对实验环境的要求低,并且可以针对很大波长范围内的激光进行 LC-SLM 相位调制特性的测量和标定。更重要的是,所提出的利用高位深相位光栅图标定 LC-SLM 得到的 LUT 文件可以使 LC-SLM 根据加载相位对光束进行有效调制,且调制效果得到提升。

1 LC-SLM 的标定原理

对于单轴液晶分子,当光波经过液晶分子传播时,沿液晶分子长轴方向具有非寻常折射率 n_e ,垂直分子长轴方向具有寻常折射率 n_o 。液晶分子的等效折射率 n 为:

$$n = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

式中, θ 为未加外电场时液晶分子长轴与加外电场时液晶分子长轴的夹角。具有波长为 λ 的线偏振光通过厚度为 d 的液晶层后,产生的相位差 ψ 为:

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-d/2}^{d/2} [n(\theta) - n_o] dz \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可知,通过控制液晶分子指向矢,即通过调节的大小来控制出射光波的相位差,从而

实现对光波的相位调制^[12]。而 LC-SLM 的液晶是单独受液晶两端电压控制的, LC-SLM 制造商将计算机显示灰度值与驱动电压建立映射关系,从而通过计算机输出的灰度信号来控制 LC-SLM 的相位调制量。

针对特定波长激光的 LC-SLM 的标定,就是找出计算机灰度信号与相位调制量之间的对应关系。夫琅禾费近似条件下,光的远场分布与出射光场分布呈傅里叶变换关系。当放在透镜前的 2 维相位光栅被相干光照明时,透镜后焦面的光强分布等于透镜前相位光栅的傅里叶变换的平方^[13]。透镜后焦面处零级衍射光斑的相对光强与相位光栅的相位调制量之间的关系为:

$$I = (1 + \cos \Delta\psi) / 2 \quad (3)$$

计算机灰度信号由 LC-SLM 上加载的国际棋盘状光栅相位图决定。该相位图控制平面被分成两个交错的部分区域,白色区域相位控制电压固定,深色区域的相位控制电压呈线性变化。在纯相位液晶空间光调制器(Reference Model P512-0635-DVI-60Hz)控制软件上,可以加载 16 位深度的 RGB 相位图。在计算相位图时,设定棋盘白色区域灰度值为 0,棋盘深色区域灰度值呈线性变化(灰度:0 ~ 65535)。计算机灰度信号控制液晶分子两端电压。

24 位 RGB 图像(灰度:0 ~ 65535)中每个像素由 R (red), G (green), B (blue) 3 个分量组成,每个 R, G, B 分量都由 8 位灰度图像表示(灰度:0 ~ 255),在内存中 R, G, B 各分量的排列顺序为: B, G, R 。纯相位液晶空间光调制器(Reference Model P512-0635-DVI-60Hz)的数字视频接口(digital visual interface, DVI)是 16 位深度系统。因此在计算机控制软件上加载 24 位 RGB 图像时,8 位 G 分量为最高有效位,8 位 R 分量为最低有效位,8 位 B 分量不起作用。在计算机控制软件上加载 8 位深度灰度图像时,这 8 位深度直接作用于 8 位 G 最高有效位,其它两个 R, G, B 分量不起作用。

为了提高对 LC-SLM 的标定精度,计算 16 位深度棋盘状相位光栅图。如图 1 所示,在计算机控制界面上加载 24 位 bmp 格式的棋盘状相位光栅图。其中,8 位 G 分量为最高有效位,8 位 R 分量为最低有效位,8 位 B 分量不起作用。将一个灰度值(0 ~ 65535)由两个 8 位二进制数组合表示,8 位 G 分量为高位,8 位 R 分量为低位。在 LC-SLM 上加载 16 位深度棋盘状相位光栅图,采集探测 CCD 中衍射光斑中心光强,最后

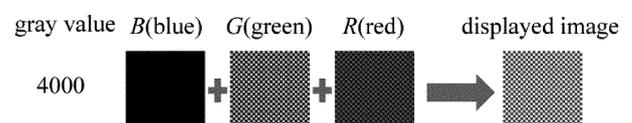


Fig. 1 Schematic of 16bit phase grating

计算得到与棋盘深色格子灰度值相对应的相位调制量。

如图 2 所示,首先搭建实验光路系统,保证 LC-SLM 的正常使用和实验验证。其次计算绘制 16 位深度棋盘状相位光栅图,其棋盘深色区域相位延迟量呈线性变化,即深色区域灰度值呈 0 ~ 65535 线性变化。最后将相位光栅图依次加载在 LC-SLM 上,则光栅后面的透镜后焦面处形成衍射光斑。记录其衍射光斑中心光强,根据光强信号,由(3)式计算得到相位光栅的

相位调制量,并得到灰度级与相位调制量之间的关系。在纯相位液晶空间光调制器(Reference Model P512-0635-DVI-60Hz)计算机控制软件中,有一个专门的界面是添加对于不同波长标定的 LUT 文件。LUT 文件由两列数字组成,第 1 列为空间光调制器输入灰度级,第 2 列为输出灰度级。由测得的灰度级与相位调制量之间的关系,进一步可以制成 LUT 标定文件,实现针对特定激光波长 LC-SLM 的标定。

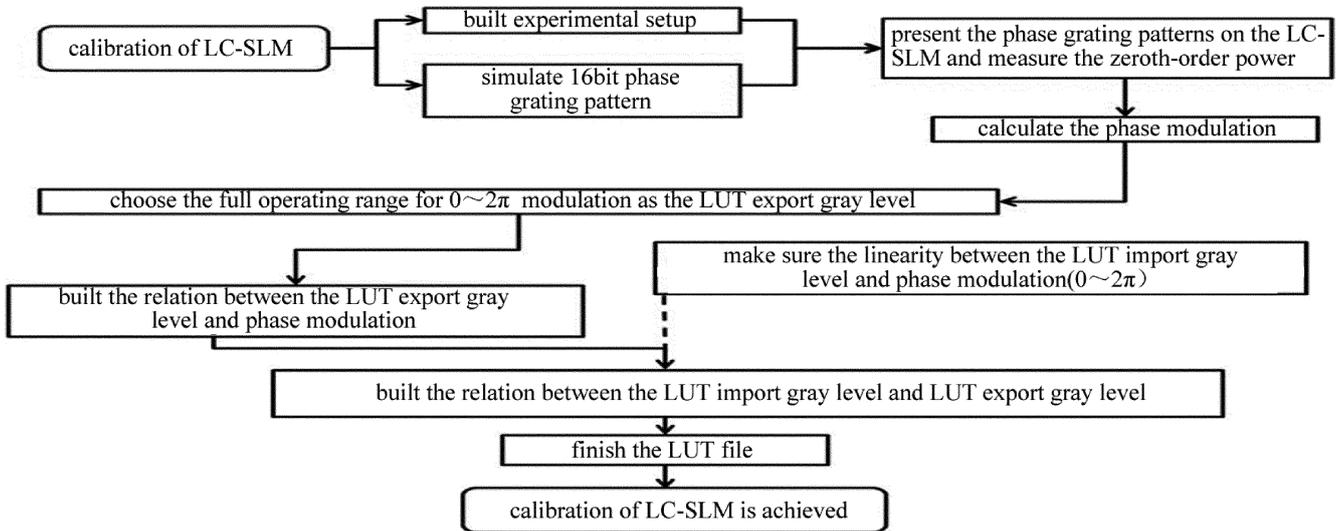


Fig. 2 Schematic flow chart of LC-SLM calibration

2 LC-SLM 的标定

图 3 为标定 LC-SLM 的实验光路系统。488nm 激光通过偏振片使光束线偏振方向符合空间光调制器要求的偏振方向。激光接下来依次通过焦距为 30mm 的透镜 1,焦距为 100mm 的透镜 2 进行扩束,再经过孔径光阑调节光束口径,使光束口径刚好充满空间光调制器作用面。光束通过反射镜 1,入射在空间光调制器上。通过调节反射镜的 2 维调节旋钮可以微调光束入射在液晶空间光调制器上的位置,使光束中心与空间

光调制器作用面中心重合。光束经过 LC-SLM 调制光束相位,并通过反射镜 2、反射镜 3 出射。通过调节反射镜 2、反射镜 3 的 2 维调节旋钮可以保证出射光束的准直性。光束经过焦距为 150mm 的镜头 3 聚焦在探测 CCD 中成像。

当 LC-SLM 上加载棋盘状相位光栅图时,入射光束经空间光调制器调制后出射,经透镜聚焦在探测 CCD 上形成衍射光斑。由(3)式可知,衍射光斑中心相对光强与棋盘状相位光栅图的相位延迟量有关。由于空间光调制器的 DVI 系统是 16 位深度,将棋盘状相位光栅图深色格子部分以灰度值最小值 0,最大值 65535 线性递增依次赋值。由于数量较大,深色格子灰度值以 0 为初始值,500 为公差,等差递增至 65535,取共 132 张灰度值变化的相位光栅图。不同的相位图加载在空间光调制器上时,衍射光斑中心光强发生变化。为了比较衍射光斑中心光强变化,图 4 中演示的

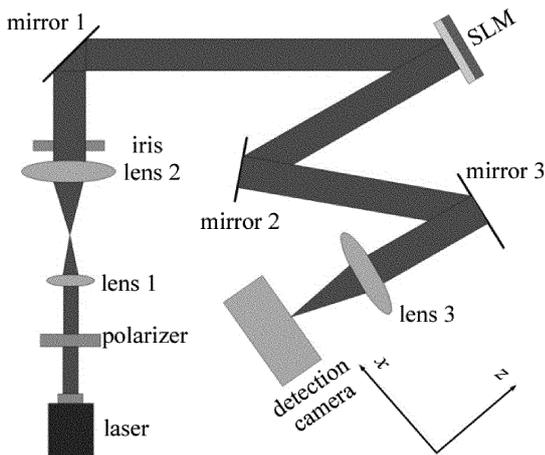


Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

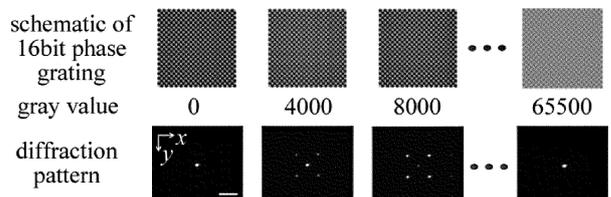


Fig. 4 Diffraction spot

是当棋盘状灰度图深色格子部分灰度值为 0, 4000, 8000, …, 65500 时, 探测 CCD 接收到的衍射光强分布。比例尺为 50 μm。

在如图 3 所示实验光路系统中, 空间光调制器加载棋盘状相位光栅图, 其中深色格子灰度级依次为 0, 500, 1000, 1500, …, 65500。探测 CCD 分别记录下衍射光斑中心光强, 计算出相对光强 I , 并代入(3)式得到一组与之相对应的相位调制量数据。图 5a 所示为棋盘状相位光栅图深色格子灰度级与衍射光斑中心相对光强之间的关系。从图中可以看到, 在 53500 ~ 65500 灰度级范围内空间光调制器可以实现 0 ~ 2π 相位调制, 53500 ~ 65500 灰度级与相位调制量之间的关系如图 5b 中虚线所示。

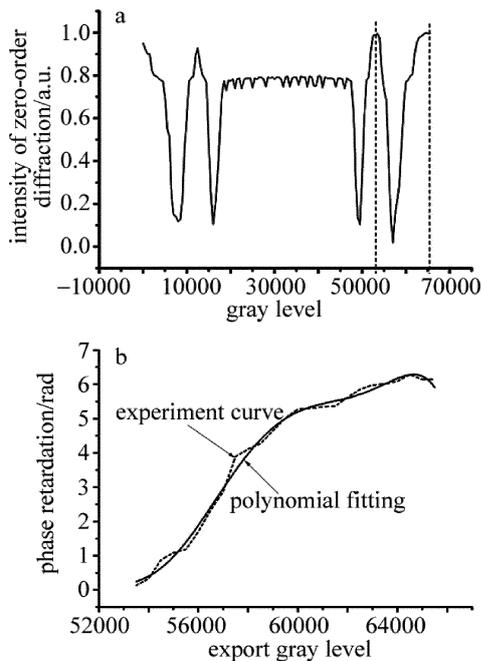


Fig. 5 a—relation between gray level and intensity of zero-order diffraction spot b—relation between export gray level and phase retardation

因此, 在制作 LUT16 标定文件时, 灰度级 53500 ~ 65535 作为 LUT 文件输出灰度级, 0 ~ 65535 作为 LUT 文件输入灰度级。已知 LUT 文件输出灰度级与相位调制量之间的关系(见图 5b 虚线), 利用六次多项式拟合函数得到下式:

$$f(x) = -7.00 \times 10^{-23}x^6 + 2.46 \times 10^{-17}x^5 - 3.61 \times 10^{-12}x^4 + 2.81 \times 10^{-7}x^3 - 0.01x^2 + 287.09x - 2.78 \times 10^6 \quad (4)$$

拟合曲线如图 5b 中实线所示。

接着, 需保证 LUT 输入灰度级与相位调制量呈线性关系才能使 LC-SLM 准确对光束进行调制。由此条件与(4)式可以得到 LUT 文件的输入灰度级与 LUT 文件输出灰度级之间的关系, 如图 6 所示。这样便完成了利用 16 位深度光栅相位图针对 488nm 激光对

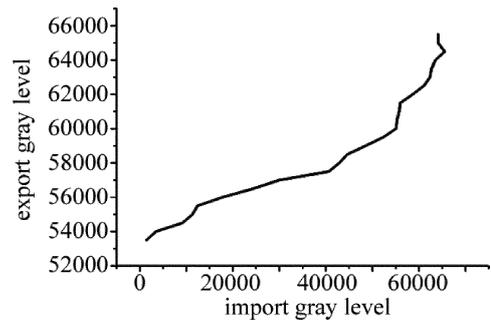


Fig. 6 Relationship between import gray level and export gray level (LUT16) LC-SLM 进行标定的 LUT 文件(LUT16)。在调制光束时, 只需在 LC-SLM 上加载相位图与 LUT16 文件, 就可以精确地按照相位图对 488nm 光束进行调制。

3 实验结果分析

搭建如图 3 所示的实验光路系统, 在 LC-SLM 上加载 0 ~ 2π 涡旋相位, 并分别在控制软件上加载输入输出呈线性关系的 LUT 文件、利用 8 位深度光栅相位图对 488nm 激光标定的 LUT 文件(LUT8)、利用 16 位深度光栅相位图对 488nm 激光标定的 LUT 文件(LUT16), 入射光束经 LC-SLM 调制后, 被 150mm 透镜聚焦于探测 CCD 上, CCD 依次探测光强分布。如图 7 所示, 图 7a 为 0 ~ 2π 涡旋相位; 图 7b 为当控制软件上加载 LUT(linear)文件时, CCD 接收到的光强分布; 图 7c 为当控制软件上加载 LUT8 文件时, CCD 接收到的中空光斑光强分布; 图 7d 为当控制软件上加载 LUT16 文件时, CCD 接收的中空光斑光强分布形状; 图 7e ~ 图 7g 分别为图 7b ~ 图 7d 在经过光斑中心的 y 方向上的光强分布, 如图 7c 中白色虚线所示。

如图 7b ~ 图 7d 所示, 当输入输出呈线性关系的 LUT 文件与 0 ~ 2π 涡旋相位共同作用于入射光束时, 基本没有改变入射光束的光强分布, 并未生成中空光斑; 当利用 LUT8 文件加载于计算机控制软件且 0 ~ 2π 涡旋相位加载于空间光调制器上时, 生成了中空光斑, 但形状并不规整、能量分布不均匀; 当 LUT16 文件与 0 ~ 2π 涡旋相位共同作用于待调制的光束时, 生成了形状规则且能量分布均匀的中空光斑。中空光斑质量可表示为:

$$K = 2(I_1 - I_0)/(I_1 + I_2) \quad (5)$$

式中, I_0 为波谷光强, I_1 为第 1 个主峰光强, I_2 为次主峰光强^[14-15]。由图 7e 可以看出, 光束经过空间光调制器后并没有被调制成中空光斑形状, 故无法计算中空光斑质量。结合图 7e ~ 图 7g 中得到的数据与(5)式, 分别计算得到 K 值, 计算结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 图 7g 的 K 值为 0.76 是图 7f 的 K 值 0.53 的 1.43 倍, 即中空光斑质量提高了 1.43 倍。从

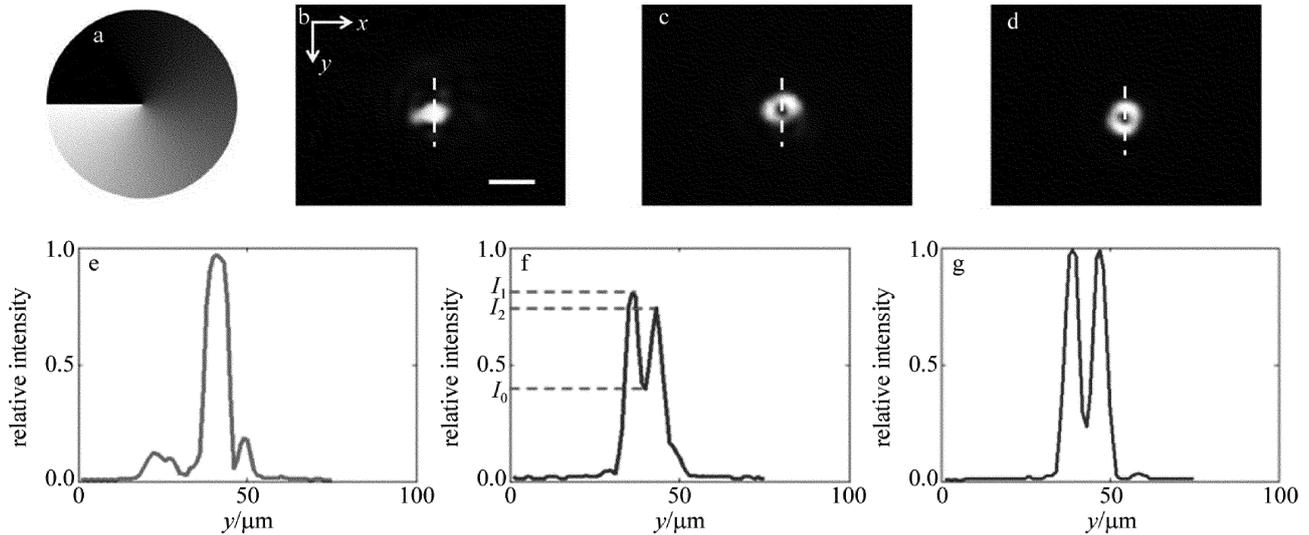


Fig. 7 a— $0 \sim 2\pi$ vortex phase b—spot with LUT phase modulation c—spot with 8bit LUT phase modulation d—spot with 16bit LUT phase modulation e—g—intensity distribution of Fig. 7b ~ Fig. 7d, respectively

Table 1 Spot quality of hollow circular beam of Fig. 7e ~ Fig. 7g

parameter	I_0	I_1	I_2	K
Fig. 7e	—	—	—	—
Fig. 7f	0.3961	0.8039	0.7451	0.5265
Fig. 7g	0.2353	0.9922	0.9882	0.7644

而可以得出,利用 16 位深度相位光栅图对 488nm 激光标定的 LUT 文件与利用 8 位深度相位光栅图对 488nm 激光标定 LUT 文件相比,利用前者对 LC-SLM 进行标定,校准精度得到提升。

精度是测量值与真值的接近程度,可以利用最大误差来表征,最大误差越小精度越高^[16]。右旋圆偏振光经 LC-SLM 调制生成的中空光斑在理论上的主峰相对光强为 1,波谷相对光强为 0。结合表 1,图 7f 中相对光强最大误差为 0.3961,图 7g 中相对光强最大误差为 0.2353。因此图 7g 中的相对光强误差更小,精度更高。综上所述,相比于 LUT8, LUT16 对 LC-SLM 的标定精度更高。

4 结论

液晶空间光调制器(LC-SLM)中的液晶对于不同波长激光入射时产生的双折射效应不同。因此针对特定波长激光,需重新建立计算机灰度信号与相位调制量之间的关系,重新对 LC-SLM 进行标定。

本文中提出了一种提高 LC-SLM 校准精度的方法。通过数据处理得到针对 488nm 激光的 LC-SLM 标定 LUT 文件(LUT16),从而实现对 LC-SLM 的校准。如此以来,就可以利用 LUT16 文件与 LC-SLM 上加载的相位图共同实现对光束的精确调制。实验结果表明,针对 488nm 激光在 LC-SLM 上加载 $0 \sim 2\pi$ 涡旋相位和 LUT16 文件,可以成功调制光束得到中空光斑。

这与结合 LUT8 文件调制得到的中空光斑相比,光斑质量从 0.53 提高到 0.76,提高了 1.43 倍。综上所述,与其它标定 LC-SLM 的传统方法相比,利用高位深相位光栅图对 LC-SLM 校准的方法,实验光路系统简单、对实验环境的要求低,可针对任意波长进行 LC-SLM 标定,而且具有更高的精度。

参考文献

- [1] McMANAMON P F, DORSCHNER T A, CORKUM D L, *et al.* Optical phased array technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84 (2):268-298.
- [2] O'BRIEN D C, FAULKNER G E, WILKINSON T D, *et al.* Design and analysis of an adaptive board-to-board dynamic holographic interconnect[J]. Applied Optics, 2004, 43(16):3297-3305.
- [3] LI C, XIAM L, MU Q, *et al.* High-precision open-loop adaptive optics system based on LC-SLM[J]. Optics Express, 2009, 17(13):10774-10781.
- [4] ENGSTROM D, PERSSON M, BENGTSSON J, *et al.* Calibration of spatial light modulators suffering from spatially varying phase response [J]. Optics Express, 2013, 21(13):16086-16103.
- [5] ZHANG H X, ZHANG J, WU L Y. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a Twyman Green interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(9):1360-1364 (in Chinese).
- [6] CAO L, XUAN L, HUL F, *et al.* Investigation of optical testing with a phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. Optics Express, 2005, 13(4):1059-1065.
- [7] CHEN H X, SUI Z, CHEN Z P, *et al.* Optical modulation characteristics of liquid crystal television (LCTV) and its application in optics information processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(8):741-745 (in Chinese).
- [8] ZHAO X F, LI D H, CHEN Z P. Measuring phase modulation characteristics of liquid crystal spatial modulators by using cyclic radial shearing interference[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2002, 39(4):675-679 (in Chinese).
- [9] REN X Y, CAI C W, WANG Z, *et al.* The phase modulation properties measurement of LC-SLM by common path lateral shearing interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(5):899-904 (in Chinese).

- nese).
- [10] DOU R, GILES M K. Closed-loop adaptive optics system with a liquid crystal television as a phase retarder[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(14):1583-1585.
- [11] KELLY T L, MUNCH J. Phase aberration correction with dual liquid-crystal spatial light modulators[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22):5184-5189.
- [12] YU Zh. Theoretical simulating and experiment research of beam shaping based on liquid crystal spatial light modulator[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2010;1-52(in Chinese).
- [13] YAMAUCHI M, MARQUEZ A, DAVIS J A, *et al.* Interferometric phase measurements for polarization eigenvectors in twisted nematic liquid crystal spatial light modulators[J]. *Optics Communications*, 2000, 181(1/3): 1-6.
- [14] FENG G Y, ZHOU S H. Discussion of comprehensive evaluation laser beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7):1643-1653(in Chinese).
- [15] KONG N N, LI C, XIA M L, *et al.* Calibration of phase-modulation properties of liquid-crystal spatial-light modulator by mask phase method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0305002(in Chinese).
- [16] ZHAO Q, MENG Q A, JIANG Z W, *et al.* Study on parameter measurement precision of high energy laser beam with large aperture[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(1): 100-103(in Chinese).