

引用格式:徐宁,付跃刚,浦东,等.液晶空间光调制器的波像差校正设计与实现[J].电光与控制,2018,25(1):79-82. XU N, FU Y G, PU D, et al. Design and implementation of wave-front aberration correction by liquid crystal spatial light modulator[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(1):79-82.

## 液晶空间光调制器的波像差校正设计与实现

徐宁, 付跃刚, 浦东, 温春超  
(长春理工大学光电工程学院, 长春 130022)

**摘要:**针对光学系统存在的像差,提出一种基于液晶空间光调制器的波像差校正方法。对于平行光入射情况,采用数字波面移相干涉仪对光学系统的波前进行精确测量,得到畸变波前的矩阵数据;对于有限远物距的成像,采用 Zemax 软件模拟得到波前的矩阵数据,利用 Matlab 编写像差拟合程序将共轭波前的矩阵数据绘制成相应的 8 位 BMP 格式的灰度图。根据液晶空间光调制器的位相调制原理,将共轭灰度图和调制器自身的波前畸变校正图同时加载于硅基液晶面上,成像分辨率达到 1348 LW/PH,高于不加载灰度图的 337.8 LW/PH。实验结果表明:通过加载波前数据的共轭灰度图,可有效提高光学系统的成像质量。

**关键词:**波像差校正;液晶空间光调制器;波前测量;分辨率

**中图分类号:** TN256 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.01.017

## Design and Implementation of Wave-Front Aberration Correction by Liquid Crystal Spatial Light Modulator

XU Ning, FU Yue-gang, PU Dong, WEN Chun-chao

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In view of the aberration of optical systems, a wave aberration correction method based on liquid crystal spatial light modulator is proposed. As to infinity imaging (parallel light), digital wave-front phase-shifting interferometer is used for accurately measuring the wave-front of an optical system, thus to obtain the wave-front data matrix. As to finite focus distance, Zemax simulation is used to obtain the wave-front data matrix. With Matlab, the aberration fitting program is compiled and the conjugate wave-front data matrix is changed to a corresponding 8-bit conjugate gray-scale image in BMP format. According to the phase modulation principle of liquid crystal spatial light modulator, the conjugate gray-scale image and wave-front distortion correcting image of the modulator are loaded on the silicon based LCD panel. The imaging resolution reaches 1348 LW/PH, is higher than that of 337.8 LW/PH without loading the gray-scale. The test shows that, the imaging quality of photographic systems can be notably enhanced by loading conjugate gray-scale images of wave-front data.

**Key words:** wave aberration correction; liquid crystal spatial light modulator; wave-front measurement; resolution

### 0 引言

在完成光学系统的设计、加工和装调后,仍然存在偏心、倾斜、各光学元件间的间隔误差等失调,胶的固化也会产生镜片上的应力,这些最终都会影响光学系统的成像质量,即存在波像差。利用自适应光学中的变

形镜或液晶空间光调制器可以较为方便地对光学系统进行像差校正。近年来,随着液晶显示技术和大规模集成电路的发展,液晶空间光调制器有逐渐取代变形镜的趋势<sup>[1]</sup>。液晶空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)作为波前校正器具有分辨率高、能耗低、体积小、易于控制、线性良好、调制量大且光能利用率高等优点<sup>[2]</sup>。相比复杂的变形镜,采用高效的液晶空间光调制器能实现对畸变波前的精确校正,文献[3]采用液晶空间光调制器校正了人眼畸变波前。

本文选用 X13138-01 型空间光调制器,分析了物

收稿日期:2017-02-22

修回日期:2017-09-21

基金项目:国家自然科学基金(11474037)

作者简介:徐宁(1995—),男,浙江温州人,学士,研究方向为光学检测。

距不同时如何补偿波像差并通过实验验证液晶空间光调制器进行波像差校正的可行性,还采用 Imatest 软件对实验结果进行了验证。

### 1 波前数据的测量和输出

#### 1.1 干涉仪的测量和输出

数字波面移相干涉仪可以精确测量光学系统的波前,提供下一步校正所需要的数据。采用的数字波面移相干涉仪为美国 Zygo 公司的 GPI-XPIV 干涉仪,其原理可参考斐索干涉仪,仪器本身的准确度使得只需要把偏振片、光学系统和反射镜置于干涉仪前即可<sup>[1]</sup>。仪器采用的干涉方法是移相干涉法,其主要特点是测量精度高,不确定度可达到 1/50 波长。此外,仪器所提供的数据处理软件可以导出波前的二进制 data 文件,同时提供了将二进制文件转换成以 ASCII 码存储的波前 XYZ 值的 exe 程序。通过得到详细的波前数据矩阵,就可以准确地对波前进行校正。

由于液晶空间光调制器必须在偏振光的作用下才能起到调制作用,偏振片势必要加入光路中,并带来相应的波像差,所以在利用 Zygo 干涉仪进行测量时,需同时测量光学系统和偏振片,以确保测量的准确性,测量结构如图 1 所示。

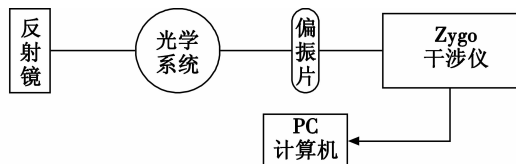


图 1 测量结构图

Fig. 1 Measurement structure diagram

本文选用焦距 35 mm、直径 25.4 mm、曲率半径 34.86 mm 的 K9 球面对称双凸透镜作为一个大像差的光学系统进行实验,测量实验光路结构如图 2 所示,实验结果如图 3 所示。



图 2 实验光路结构

Fig. 2 The experiment optical structure

从图 3 中可以看出,通过 Zygo 干涉仪测量后,在其自身的 MetroPro 软件中,可以以灰度显示波前图样,并给出 36 项 Zernike 多项式的系数。光学系统或光学元件的波前总是连续和光滑的,因此用连续函数表征光学系统的波像差或面形,通常采用一系列正交的 Zernike

多项式的线性组合表示<sup>[4]</sup>。Zernike 多项式具有相当的精度,但多项式毕竟是拟合,不是完全的重合,而 Metro-Pro 软件直接导出的波前 data 数据则更为准确。

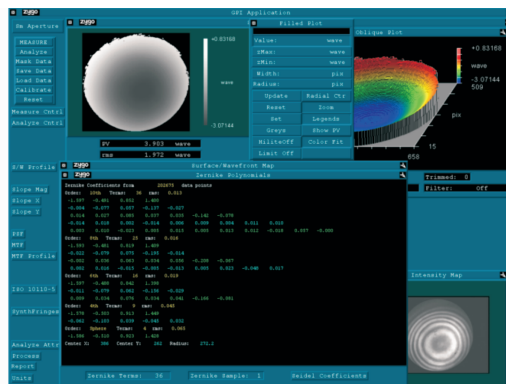


图 3 Zygo 干涉仪输出界面

Fig. 3 Interferometer output interface

MetroPro 软件直接导出的数据为二进制形式的 dat 文件(Binary Data File (MetroPro ".dat" format)),一般无法直接利用。在 MetroPro 之外,Zygo 公司提供了将二进制文件转换为其他格式如 CODE V, RAW ASCII, XYZ 等格式的 exe 程序。使用 Zygo 软件 Metro-Pro 文件夹中的 dat\_to\_xyz.exe 程序,将二进制数据转换为 XYZ 二维矩阵数据<sup>[5]</sup>。

XYZ 数据文件由两部分组成,分别是页眉信息和测量数据。测量数据的前两列为 X, Y 坐标,第三列为 Z 坐标,是以波长为单位的波前数据,表示测量出来的波前相对于理想波前的差值。该数据是从负几个 λ 到正几个 λ 的浮点型数据,需要进行一定的处理以绘制正确灰度图。

$$Z_1(x, y) = - \{ Z_0(x, y) - \max[ Z_0(x, y) ] \} \quad (1)$$

$$Z(x, y) = \begin{cases} Z_1(x, y) \times 255 & Z_1 \leq 1 \\ \text{mod}[ Z_1(x, y) \times 255, 255 ] & Z_1 > 1 \end{cases} \quad (2)$$

首先以数据中的最大值为 0,通过式(1)将原始数据 Z<sub>0</sub> 转换成共轭的 Z<sub>1</sub>,再根据式(2)将波前数据放大到 0 ~ 255 数量级,不过此时仍然是带有小数点的浮点型,最后将 Z 坐标转换为 uint8 整型,即可利用 Matlab 自带的 imwrite 函数绘制出准确的 8 位 BMP 格式灰度图。

将测量数据导入 Matlab 程序,编程画图,得到如图 4 所示的 8 位 BMP 灰度图。



图 4 通过 Matlab 编程输出的灰度图

Fig. 4 Gray-scale image output by Matlab programming

从图 3 和图 4 的对比中可以发现,两者灰度图的外形轮廓一致,但图 3 中心为黑色而图 4 中心为白色,两者成互补关系。此外,图 4 呈现出黑白交替的圆环样式,这是为了实现大于  $2\pi$  的周期性调制,  $0 \sim 2\pi$  相位对应  $0 \sim 255$  灰度。

### 1.2 Zemax 模拟的输出

Zemax 是一套综合性的光学设计仿真软件,利用 Zemax 可以得到有限远物距条件下的波前数据。在软件的 Analysis 菜单中,选择 Wave-front 中的 Wave-front Map 选项并设置相应的参数即可得到如图 5 所示的模拟光学系统的波前结果。

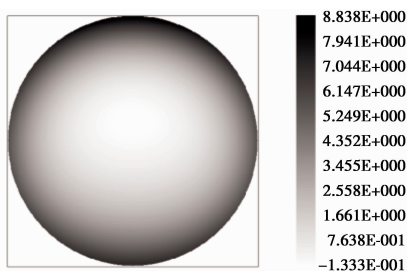


图 5 Zemax 模拟的波前结果

Fig. 5 Simulation result of wave-front by Zemax

在 Wave-front Map 窗口中点击 Text 菜单,即可获得 txt 文本文档格式的波前矩阵数据。由于 Zemax 中同样是以波长为单位,将数据导入 Matlab 中,采用同样的程序即可绘制出控制液晶空间光调制器的灰度图,如图 6 所示。

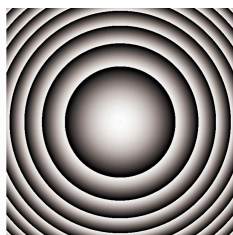


图 6 Zemax 模拟结果输出的灰度图

Fig. 6 Simulation result of gray-scale images by Zemax

## 2 液晶空间光调制器的校正

校正波像差的核心器件为液晶空间光调制器,这是一种对光波的空间分布进行光学调制的器件<sup>[6]</sup>。一般地说,空间光调制器由许多独立单元组成,它们在空间上排列成一维或二维阵列,每个单元都可以独立地接受光学信号或电学信号的控制,并按此信号改变自身的光学性质,从而对照明在其上的光波进行调制<sup>[7]</sup>。

Hamamatsu 硅基液晶空间光调制器(Liquid Crystal on Silicon Spatial Light Modulator, LCOS-SLM)是纯相位调制,相比于其他液晶空间光调制器,拥有线性好、调制量大和光能利用率高的特点,图 7 所示为 X13138 系

列液晶空间光调制器的相位调制曲线,表 1 为其性能参数。

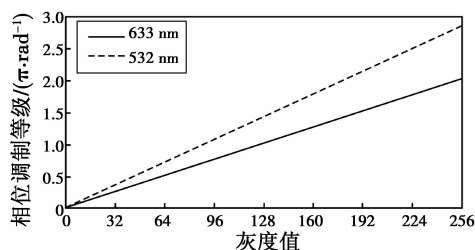


图 7 X13138 系列调制器的相位调制曲线

Fig. 7 Phase modulation curve of X13138 series modulator

表 1 X13138-01 型空间光调制器的性能参数

Table 1 Performance parameters of X13138-01 type spatial light modulator

参数名称	数值
像素数	1272 × 1024
像素大小/ $\mu\text{m}$	12.5
有效面积/ $\text{mm}^2$	16 × 12.8
工作波长/ $\text{nm}$	400 ~ 700
633 nm 时光能利用效率/%	76

调制器的像素数越多,像素大小越小,对波前的调制越精密,工作波长决定了应用范围,光能利用率越高,光能损失越低<sup>[8]</sup>。X13138-01 型空间光调制器是反射型调制器,可以选择分光光路或斜入射光路。目前反射式液晶空间光调制器都是在入射偏振光垂直入射下使用的,在光路中采用分光器件(例如分光棱镜)将入射光和出射光分离,分光器件的引入会导致光强的损失,使得液晶空间光调制器的使用受到限制。入射偏振光以一定的角度斜入射到液晶空间光调制器上可以解决分光器件带来的光强损失问题<sup>[9]</sup>。根据日本滨松光子学株式会社提供的说明书以及文献[9]的实验验证,当入射角度小于  $5^\circ$  时,相位调制曲线几乎重合,所以采用了  $5^\circ$  入射角的反射光路,如图 8 所示。为了能精确对准目标,先在物方使用氦氖激光器照射,确定光轴,再用 ISO12233 测试卡代替激光器。

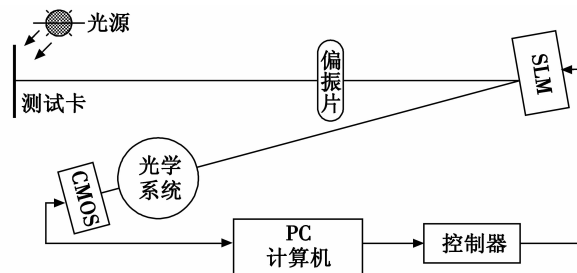


图 8 波像差校正结构图

Fig. 8 Wave aberration correction structure

实验过程如下:按照图 8 搭建好光路,选用单透镜作为光学系统,测试卡和光学系统轴向距离 500 mm,用波长为 633 nm 的红色 LED 光源照射测试卡。液晶

空间光调制器上加载全黑的图像,此时调制器不起作用等同于平面反射镜,微调 CMOS 和光学系统的位置和角度,使得测试卡进入视场,再调整透镜和 CMOS 距离进行对焦,此时保存图像得到图 9a,再在液晶空间光调制器上加载通过 Matlab 输出的共轭波前的灰度图,对畸变波前进行校正,保存图像得到图 9b。

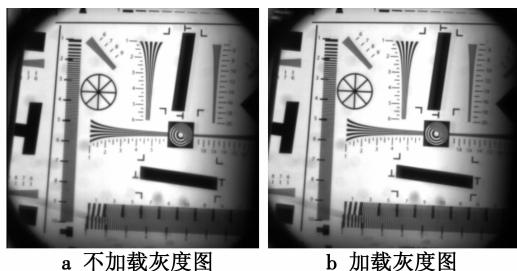


图 9 CMOS 拍摄的测试卡

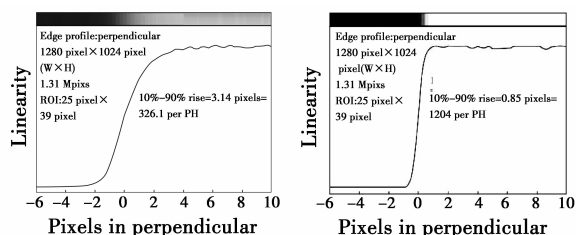
Fig. 9 Test cards shot by CMOS

### 3 校正结果评价

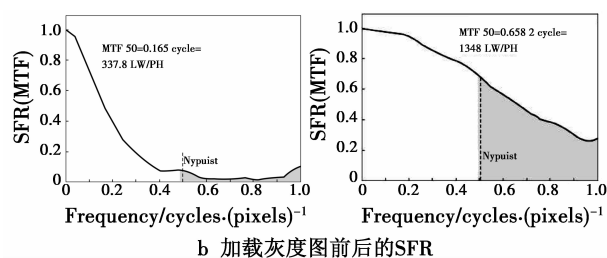
图 9a 与图 9b 相比,图 9b 中的黑色斜长条的边缘更加锐利,黑白对比更加明显。分别对垂直、水平方向的楔形图进行人工读数判读,图 9b 比图 9a 均高出 0.5 个数值,根据目视分辨率的计算公式:目视分辨率 =  $100 \times \text{目视读数} \times 0.3 \times \text{像高} / \text{楔形图长}$  (水平图) 或  $\text{楔形图高}$  (垂直图),单位为 LW/PH (线宽/像高),图 9b 中垂直楔形图的目视分辨率约为 410 LW/PH,相应的图 9a 结果约为 340 LW/PH。不过目视读数存在读数误差,用软件读数能获得更加准确的对比结果。

Imatest 软件是美国 Imatest LCC 公司开发的一款被广泛应用的数码图像评测软件,其整个系统基于 Matlab 建立,包含了多个功能模块,如 SFR, Colorcheck, Step-chart 等。Imatest 软件采用了更低成本的空间频率响应 (SFR) 来测量 MTF 曲线。该方法简单,只需要分析带有一定倾斜角度的黑白双色斜线图案 (Slanted Edge) 即可获得所需 MTF 曲线<sup>[10]</sup>。

如图 10 所示,从空间频率响应的 MTF50 结果来看,加载灰度图后达到 1348 LW/PH,明显高于不加载灰度图的 337.8 LW/PH,其中, LW/PH 是空间频率响应的单位,代表线宽/像高,即液晶空间光调制器改善了图像质量,对波前畸变起到了很大的校正作用。



a 加载灰度图前后的Linearity



b 加载灰度图前后的SFR

图 10 Imatest 软件的评判结果

Fig. 10 The evaluation results of Imatest software

### 4 结论

本文主要研究了硅基液晶空间光调制器进行波像差校正的方法。利用高精度数字干涉仪测量光学系统和 Zemax 模拟得到波前矩阵数据,使用 Matlab 软件精确绘制共轭波前的灰度图,加载灰度图于硅基液晶空间光调制器,依靠调制器线性的相位调制特性,对光学系统的波像差进行了校正,并通过 Imatest 软件评价图片分辨率。最终,该方法减小了光学系统的波像差,提升了图像质量,具有适应性好、精度高和易于操作等优点。随着液晶技术的发展,未来调制器成本进一步降低且体积减小,该方法将具有广泛的应用前景。

### 参考文献

- [1] 王治华,俞信. 液晶空间光调制器相位调制测量及波前校正[J]. 光学技术,2005,31(2):196-199,201.
- [2] INOUE T, TANAKA H, FUKUCHI N, et al. LCOS spatial light modulator controlled by 12-bit signals for optical phase-only modulation [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6487:64870Y-1-64870Y-11.
- [3] 姜宝光,穆全全,曹召良,等. 液晶空间光调制器对真人眼畸变波前的校正[J]. 光学精密工程,2007,17(11):2651-2656.
- [4] 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.
- [5] ZYGO Corporation. MetroPro reference guide [M]. Connecticut:Zygo Corporation,2006.
- [6] 蔡冬梅,凌宁,姜文汉. 纯相位液晶空间光调制器拟合泽尼克像差性能分析[J]. 物理学报,2008,57(2):897-903.
- [7] MU Q Q, CAO Z L, HU L F, et al. Adaptive optics imaging system based on a high-resolution liquid crystal on silicon device [J]. Optics Express, 2006, 14(18):8013-8018.
- [8] 刘伯哈. 基于液晶空间光调制器的相干光波前实时变换的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [9] 鲁强,盛磊,张鑫,等. 斜入射下液晶空间光调制器纯相位调制特性研究[J]. 中国激光,2016,43(1):184-190.
- [10] 陈加新. 基于 Imatest 的移动终端摄像头性能评判体系[D]. 上海:上海交通大学,2014.