单透镜高分辨成像系统的研究和设计

徐 宁,付跃刚,浦 东

(长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022)

摘 要:单片凸透镜由于存在较大像差,在实际应用中难以单独成像,相对孔径越大,单片凸透镜的成像质量越差,通常使用多片透镜以进行像差校正。针对单凸透镜成像质量差的的问题,提出了采用液晶空间光调制器和微扫描光楔实现单片凸透镜的高分辨成像。采用 Zygo 干涉仪测量单透镜波前,结合 Zemax 软件模拟得到经单透镜后的畸变波前,利用泽尼克多项式描述畸变波前,并绘制对应共轭波前的灰度图加载于液晶空间光调制器上,校正波像差;通过旋转楔角为 21″的光楔进行 2×2 微扫描,将四幅低分辨率图像经过 Keren 配准后以结构适应的归一化卷积法合成为一幅高分辨率图像。实验结果表明,图像分辨率 MTF50 达到 1 348 LW/PH,成像质量明显提高。

关键词:液晶空间光调制器; 微扫描光楔; 波前校正; 高分辨重构

中图分类号:TN256 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201746.1118001

Research and design of single lens high resolution imaging system

Xu Ning, Fu Yuegang, Pu Dong

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

Abstract: Single convex lens can image objects outside of the focus length, there are a variety of problems, such as different forms of aberration and low resolution. The larger the aperture is, the lower full field MTF is. Multiple lenses are used to correct aberration. The liquid crystal spatial light modulator and micro scanning optical wedge were proposed to realize high resolution imaging with the single lens. It is suggested to use Zygo interferometer to measure single lens with Zemax software simulation wavefront, the Zernike polynomials was applied to describe the distortional wavefront, the conjugate grayscale map was drawn to load in the liquid crystal spatial light modulator and calibrated wave aberration. The optical wedge of 21″ was rotated to complete 2×2 micro scanning. Four low resolution images, through Keren registration and structure-adaptive normalized convolution algorithm, ultimately were synthesized into a high resolution image. The image resolution is promoted to 1 348 LW/PH at MTF50, which proves its effectiveness.

Key words: liquid crystal spatial light modulator; micro scanning optical wedge; wavefront correction; high resolution reconstruction

收稿日期:2017-03-05; **修订日期**:2017-04-03

基金项目:国家自然科学基金(11474037)

作者简介:徐宁(1995-),男,本科生,主要从事光学检测方面的研究。Email:ningxu1995@163.com

导师简介:付跃刚(1972-),男,教授,博士生导师,主要从事光学检测方面的研究。Email:fuyg@cust.edu.cn

0 引 言

利用单透镜成像可以使得光学系统的结构大幅简化、体积减小、成本明显下降。但单透镜成像存在一定的波前畸变,成像质量较差,当透镜相对孔径越大时,像质越差,所以如何解决波前畸变是使用单透镜成像的关键问题。

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、价格低廉等优点[1]。文中研究了一种通过液晶空间光调制器来补偿离焦和像差的方法,采用 Zemax 软件模拟和 Zygo 移相式数字波面干涉仪对畸变波面实测的方法,利用 Zernike 多项式拟合波面,日本滨松公司研制的 1 272 pixel×1 024 pixel 的纯相位式硅基液晶空间光调制器进行补偿, 并将未经过液晶空间光调制器和经过液晶空间光调制器成像的图片分别用 Imatest 进行评分,从而评价液晶空间光调制器校正波前畸变的效果。

在实现高分辨、超分辨方面,国内外学者和研究人员从不同角度提出了各种理论基础和实现方法,其中许多技术已经成功地运用于天文望远镜、航空摄影和遥感图像等领域之中[2-3]。制约光学成像分辨率的主要因素之一就是图像传感器的分辨率,即 CMOS 或 CCD 的像元尺寸的大小。在不更换更高分辨率的传感器的前提下, 如何提高图像分辨率是一个热门研究方向。文中采用了 CMOS 图像传感器在焦平面微位移的办法, 使 CMOS 在线阵方向上错开半个像元进行两次成像再合成, 即运用亚像元成像方法[4]。利用 2×2 微扫描的方式进行 4 次微小位移以提高采样频率, 使原本 CMOS 的采样频率成倍提高,从而进一步提高了成像质量。

1 液晶空间光调制器校正离焦与像差

1.1 实验光路的搭建

实验采用一个焦距 35 mm、直径 25.4 mm、曲率半径 34.86 mm 的 K9 球面对称双凸透镜。前端测试卡到透镜距离为 500 mm,后端测试卡到透镜距离为 800 mm。图 1 是系统的总体结构框图。由于受视场限制, 测试卡选用 0.5*X* 大小的反射式 ISO 12233 测试卡。为了对前端和后端的成像质量同时测试,并分别进行评价, 需要把测试卡上下错开摆放, 相互不重叠。其中光源采用波长为 633 nm 的 LED,在 CMOS 前加入微扫描光楔实现高分辨成像, 光路中加入偏振片是由于液晶空间光调制器只能在水平偏振光的条件下起作用。液晶空间光调制器通过计算机对其进行控制。图 2 为总体结构外观图。

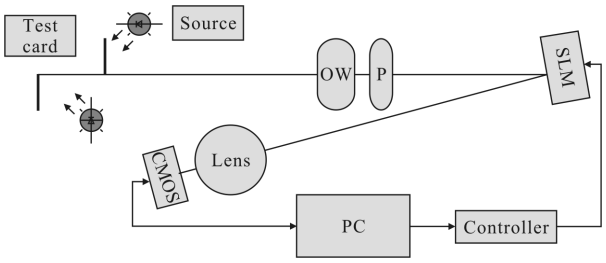


图 1 总体结构框图

Fig.1 Overall structure diagram

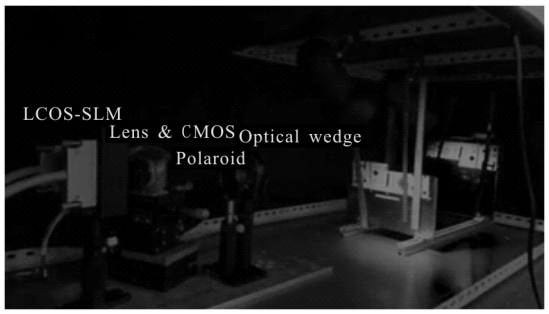


图 2 总体结构外观图

Fig.2 Overall structure of appearance

1.2 离焦的仿真与计算

对于一个由单透镜构建的光学系统,焦深较浅,成像时往往会产生离焦。调整前端测试卡与光学系统的距离,使前端测试卡正好处于物方焦平面上。只需要移动后面的测试卡便可以产生相应的离焦现象,从而体现光学系统的离焦问题。

如图 3 所示,位于 500 mm 处的测试卡处在物方焦平面上,成像清晰,但是 800 mm 处的测试卡存在

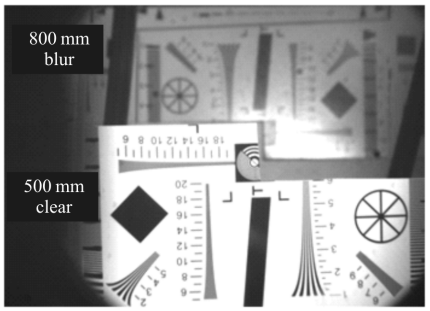


图 3 对焦 500 mm 处的图片

Fig.3 500 mm focus images

离焦模糊,即 800 mm 处的测试卡反射光的波前存在较大的畸变。通过 Zemax 仿真 500 mm 处物高半视场下的 MTF 曲线,可以看出在不添加其他元件的情况下,单透镜系统存在边缘视场比中心视场差等问题,如图 4 所示。

利用 Zemax 模拟可以得到对有限远处成像条件下的波前数据。先调整前端测试卡使其在 CMOS Sensor 上得到一个清晰的图像,再通过测算后端测试卡到透镜的距离,便可以通过 Zemax 模拟出相应的泽尼克多项式的系数,如表 1 所示。其中条纹泽尼克多项式系数的第四项表示其所拟合波前的离焦项。

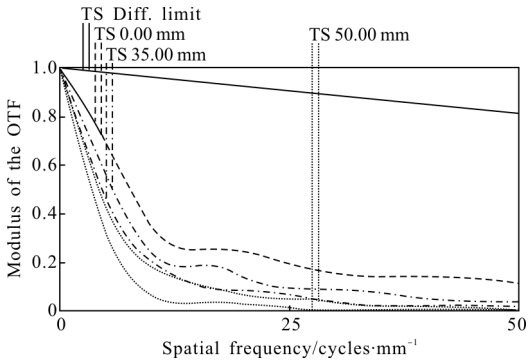


图 4 500 mm 的物高半视场下的 MTF 曲线

Fig.4 Object high half field of view MTF curve at 500 mm

表 1 500 mm 物高半视场下的条纹泽尼克系数

Tab.1 Fringe Zernike coefficient of object high half of field of view at 500 mm

1	2	3	4	5	6	7	8
6.539 201 35	0	1.056 694 37	7.104 169 97	−0.427 790 08	0	0	0.527 809 79
9	10	11	12	13	14	15	16
0.567 613 26	0	0.000 971 25	0.000 469 17	0	0	−0.000 348 03	0.002 663 20

1.3 像差的测量

对于平行光入射情况,采用数字波面移相干涉仪对单透镜的波像差进行精确测量,得到准确的畸变波前数据。

数字波面移相干涉仪可以精确测量光学系统的波前[5],提供下一步校正所需要的数据。测量实验光路如图 5 所示,通过该实验光路可测量得到详细的单透镜的畸变波前数据,就可以准确地对波前进行校正,测量结构如图 6 所示,测量结果如图 7 所示。

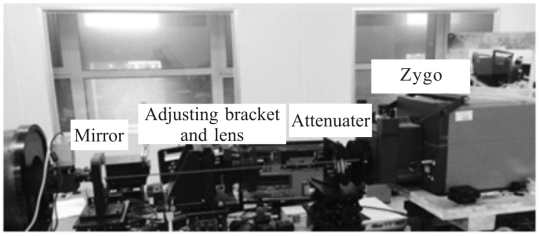


图 5 实验光路结构

Fig.5 Experimental optical path structure

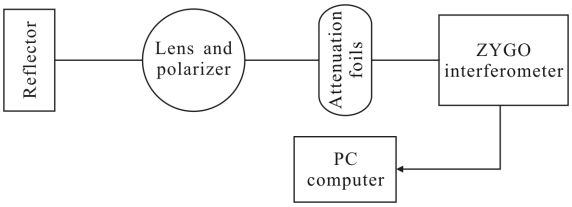


图 6 测量结构图

Fig.6 Measurement structure diagram

从图 7 中可以看出波前畸变 PV 值为 3.903。通过 Zygo 干涉仪测量后,在其自身的 MetroPro 软件输出了 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,因此可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 多项式的线性组合来表示[6-7]。

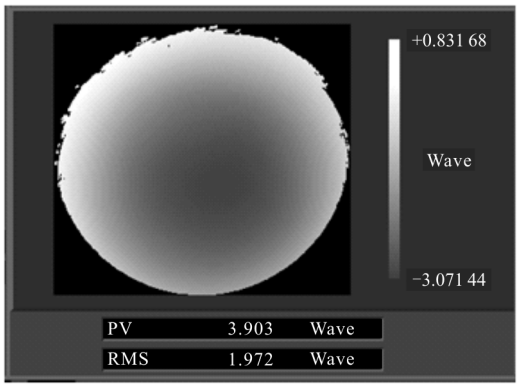


图 7 Zygo 干涉仪测量结果

Fig.7 Zygo interferometer output interface

1.4 液晶空间光调制器的波像差校正

畸变波前可用一系列正交泽尼克多项式的线性组合表示,既能满足对复杂波前相位信息的描述,同时又具有足够的精度,在圆内泽尼克多项式通常描述为如下二维极坐标形式[8-9]:

$$Z_n^m(\rho,\theta)=\begin{cases}N_n^m R_n^{|m|}(\rho)\cos(m\theta) & m\geqslant 0\\ -N_n^m R_n^{|m|}(\rho)\sin(m\theta) & m\leqslant 0\end{cases} \tag{1}$$

式中：$N_n^m=\sqrt{\dfrac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}}$，$\delta_{ij}=\begin{cases}1 & i=j\\ 0 & i\neq j\end{cases}$，$R_n^m(\rho)=\sum_{s=0}^{n-|m|/2}\times\dfrac{(-1)^s(n-s)!}{s!\left(\dfrac{n+|m|-s}{2}\right)!\left(\dfrac{n-|m|-s}{2}\right)!}\rho^{n-2s}$。

式中：m，n 分别是多项式的角向频率和径向频率数，是反映泽尼克多项式空间频率的重要参数[1]。

液晶空间光调制器需要在偏振光下进行相位调制，故在光路中添加了偏振片。当液晶空间光调制器通电后，液晶会根据所加载的灰度图进行相应的旋转，从而改变入射波面的相位分布。通过第 1.2 和第 1.3 节获得畸变波前的泽尼克多项式系数后，取其共轭，得到对应的共轭波前的泽尼克多项式系数。此时，结合液晶空间光调制器的相位调制特性，利用 Matlab 编写波像差拟合代码生成补偿离焦和像差的灰度图。再将灰度信号通过计算机传输给液晶空间光调制器的驱动电路。需要注意的是，在实验时，采用 633 nm 的单色光源，此时滨松的 X10468 系列的液晶空间光调制器在 0~2 之间的相位值与 0~255之间的灰度值具有良好的线性关系，即不需要对此波段下的相位与灰度关系进行重新标定，如图 8 所示。

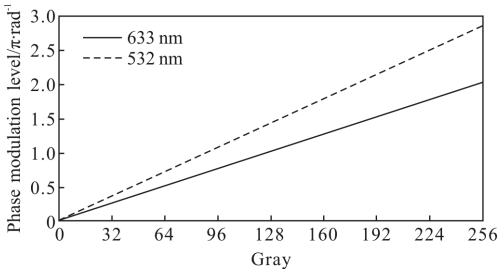


图 8 X10468 系列调制器的相位调制曲线

Fig.8 Phase modulation curve of X10468 series modulator

为了增大液晶空间光调制器所能调整的范围，将绘制的灰度图转换为菲涅耳灰度图，即增大了液晶空间光调制器的调制范围。需要说明的是液晶空间光调制器的调制范围是不可以无限增大的，X10468 系列的最大能调制至 25 的相位。图 9 为将绘制好的灰度图加载到液晶空间光调制器的软件上的情况。

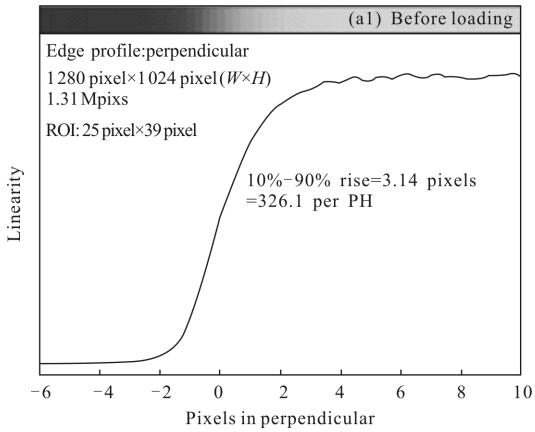
图 9 调制器驱动软件上加载菲涅耳灰度图

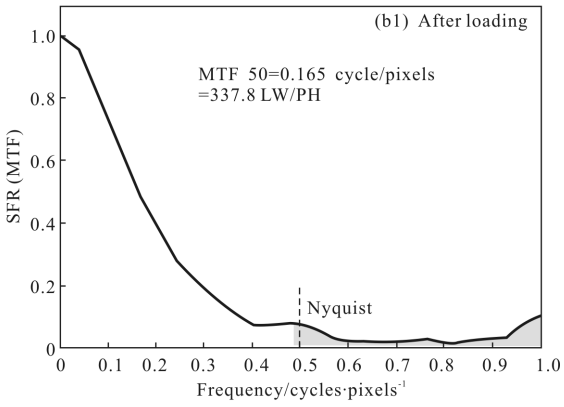
Fig.9 Modulator driver software to load the Fresnel grayscale image

1.5 液晶空间光调制器校正效果的评估

Imatest 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、Stepchart 等。Imatest 采用了更低成本的空间频率响应 (Spatial Frequency Response，SFR) 来测量 MTF 曲线，仅需分析具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[10]。

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 1 348 LW/PH，明显高于不加载灰度图的 337.8 LW/PH，其中 line width/pixel high 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





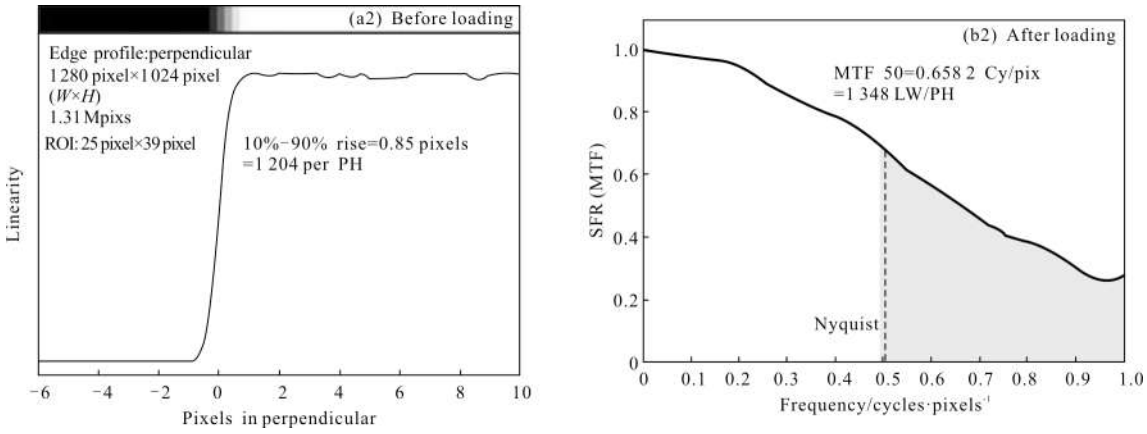


图 10 加载前后结果对比

Fig.10 Comparison of results before and after loading

了很大的校正作用。

2 微扫描的高分辨重建

上述试验系统采用 130 W 像素的 CMOS Sensor，其像元尺寸为 5.2 μm。通过液晶空间光调制器校正畸变波前后，CMOS Sensor 的分辨率限制了图片质量的提高。在现有 CMOS Sensor 的基础上，考虑通过微扫描的方式提高成像分辨率。

微扫描成像是对于同一场景进行多次的过采样成像的过程，每次采样称为分采样。微扫描成像将每次的采样所得到的图像记录下来，然后按照微扫描顺序将每次分采样所得到的图像进行重建，通过算法处理得到一张高分辨率的图像。需要指出，在采样和成像过程中要求场景和视场静止或移动很小，即微扫描成像是以牺牲时间分辨率来获得高空间分辨率的[11]。

理论上讲，扫描的次数越多、重建的效果越好[12]。但综合考虑效率因素，在本实验中，选用 2×2 微扫描方式较为理想，即通过旋转微扫描光楔拍摄 4 幅照片，通过算法合成为一幅高分辨的图片。选用 2×2 微扫描方式，由公式

$$\text{偏向角}:\delta=(n-1)\alpha \tag{2}$$

$$\text{位移量}:\Delta=\delta f_0 \tag{3}$$

根据偏向角 δ 和位移量 Δ 的公式可知光楔的楔角为 21″，加工精度为 2″，如图 11 微扫描结构原理图所示。

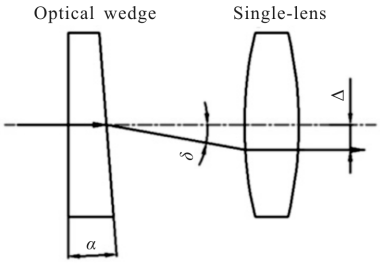


图 11 微扫描结构原理

Fig.11 Micro-scanning structure principle

当光楔绕光轴进行旋转时，光束聚焦点将在焦平面上形成以原像点为中心，以 Δ 为半径的圆周。如果旋转光学平板分别停留在 45°、135°、225°和 315°这 4 个相隔 90°的位置进行欠采样成像（如图 12 高分辨图像重建原理所示），则相邻采样点在探测器面的微位移量为：$P=L/2$[13]。式中 L 为像素间距；微扫描位移量为：$\Delta=\frac{\sqrt{2}}{4}L$。

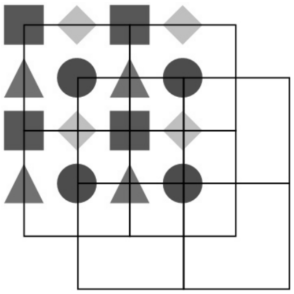


图 12 高分辨图像重建原理

Fig.12 High-resolution image reconstruction principle

为提高图像高分辨率重建技术实时应用的可能性，增强其对由于光轴抖动导致的成像位置误差的容差，采用基于 Keren 配准和结构适应的归一化卷积的快速鲁棒高分辨率图像重建算法。该算法将配准后的低分辨率图像根据变换参数映射到高分辨率网格上,再利用模板卷积迭代填充缺失像素值,从而重建一幅高分辨率图像。通过将该算法与非均匀插值法、凸集映射(POCS)法和鲁棒的迭代后向映射法 3 种高分辨率图像重建算法进行实验比较可以看出该算法在一定精度范围内，对 4 幅图像的相对位置误差不敏感,在速度和重建效果上具有一定的优势,是一种有效、鲁棒和快速的多帧高分辨率图像重建算法。从表 2 可以看出,此算法可以计算出万分之一像素的位置差异，每次运行配准程序的时间小于 1 s，即 Keren 配准算法的优点在于速度快、精度高[14]。

表 2 Keren 算法的配准结果

Tab.2 Keren algorithm registration results

	Rotations	Shifts x	Shifts y
LR_1	0	0	0
LR_2	0.000 3	−0.268 2	0.047 0
LR_3	−0.000 4	−0.243 9	0.315 3
LR_4	0.003 0	0.052 9	0.262 2

在使用 Keren 算法配准后,需要使用结构适应的归一化卷积 (structure-adaptive normalized convolution,SANC)法将图片合成在一起。

选取图片帧数 m=4,放大因子 q=2,利用两遍归一化卷积进行非均匀插值,实现高分辨率重建。图13为通过以上两种算法高分辨后的结果。

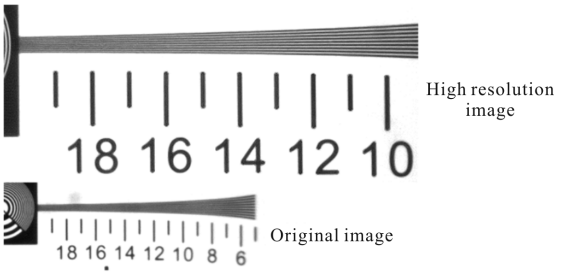


图 13 部分图像结果对比

Fig.13 Partial image results comparison

3 结 论

文中主要研究了运用液晶空间光调制器进行波像差校正和微扫描光楔提高分辨率的方法构建了单透镜的最佳成像系统。利用高精度数字干涉仪测量单透镜的像差,通过 Zemax 模拟离焦,得到以泽尼克多项式形式表示的畸变波前数据。再使用 Matlab 软件精确绘制共轭波前的灰度图，加载灰度图于液晶空间光调制器上,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。此外,运用旋转光楔进行 2×2 微扫描，通过基于 Keren 配准和结构适应的归一化卷积的图像重建算法得到了理想的高分辨率图像。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,文中研究的方法可为简化光学系统同时获得高分辨率图像提供较好的解决途径。

参考文献：

[1] Cao Zhaoliang, Mu Quanquan, Xu Huanyu, et al. Open loop liquid crystal adaptive optics systems: progresses and results [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(4): 0402002.

[2] Zheng Xianliang, Liu Ruixue, Xia Mingliang, et al. Retinal correction imaging system based on liquid crystal adaptive optics[J]. ***Chinese Optics***, 2014, 7(1): 98-104. (in Chinese)
郑贤良, 刘瑞雪, 夏明亮, 等. 液晶自适应光学视网膜校正成像技术研究[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 98-104.

[3] Xu Zhihai, Feng Huajun. Overview of research approaches for ultrahigh-resolution optoelectronic imaging [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2006, 35(4): 456-463. (in Chinese)
徐之海, 冯华君. 超高分辨光电成像技术的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(4): 456-463.

[4] Xu Zhengping, Zhai Linpei, Ge Wenqi, et al. CCD geometric superresolution method based on subpixel [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2008, 16(12): 2447-2453. (in Chinese)
徐正平, 翟林培, 葛文奇, 等. 亚像元的 CCD 几何超分辨方法[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2447-2453.

[5] Zhang Hongxin, Zhang Jian, Wu Liying, et al. Wavefront correction using liquid crystal spatial light modulator [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(6): 1062-1065. (in Chinese)
张洪鑫, 张健, 吴丽莹, 等. 液晶空间光调制器用于波前校正的研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1062-1065.

[6] Shan Baozhong, Wang Shuyan, Niu Hanben, et al. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2002, 10(3): 318-323. (in Chinese)
单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨, 等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 318-323.

[7] Jame C Wyant, Katherine Creath. Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology [M]. New York: Academic Press, 1992: 28-35.

[8] Love G D. Wavefront correction and production of Zernike modes with a liquid crystal SLM [J]. ***Appl Optics***, 1997, 10 (22): 1258-1272.

[9] Wang Xingsheng, Xian Jieyu, Yang Yong, et al. Use of coordinate measuring machine to measure circular aperture complex optical surface [J]. ***Measurement***, 2017, 100: 1-6.

[10] Chen Jiaxin. A validation system and criteria based on IMATEST for mobile device camera performance [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
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.

[11] Ma Chenhao, Fu Yuegang, He Wenjun, et al. Hartmann-Shack sensor with dualwedge microscanning in wavefront detection technology [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(9): 2813-2818. (in Chinese)
马辰昊, 付跃刚, 贺文俊, 等. 双光楔微扫描哈特曼-夏克波前探测技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2813-2818.

[12] Ma Chenhao, He Wenjun, Liu Yan, et al. Hartmann-Shack sensor based micro-scanning image detection [J]. ***Optik-International Journal for Light and Electron Optics***, 2015, 126(6): 609-613.

[13] Kim H S, Yu W K, Park Y C, et al. Compact MWIR camera with ×20 zoom optics[C]//SPIE, 2000, 4369: 673-679.

[14] Jean Fortin, Paul Chevrere. Realization of a fast microscanning device for infrared focal plane arrays [C]// SPIE, 1996, 2743: 185-196.