doi:10.3788/gzxb20154406.0610001

基于分色校正的大像差光学成像系统图像处理技术

冯彦超,冯华君,徐之海,李奇,陈跃庭

(浙江大学光电信息工程学系现代光学仪器国家重点实验室,杭州 310027)

摘 要:为解决传统大视场高分辨相机光学系统复杂、成本高昂等问题,利用同心多尺度计算成像系统, 通过图像处理方式校正简化的光学结构残留的球差和倍率色差.分析光学系统的像差特性,得到不同 波长的成像数据,并根据系统参量和像差表现,用红、绿、蓝三通道分别校正方案对图像进行处理.首先 采用非线性图像缩放法,统一不同色光的放大倍率,完成倍率色差的校正;然后针对光学系统的点扩散 函数随空间位置变化的特性,对各通道模糊图像进行分块,用 Lucy-Richardson 算法对每一个图像块进 行图像复原,完成单色像差校正;最后融合三通道获得校正图像.用均方误差、峰值信噪比和结构相似度 等方法进行图像质量评价,结果表明本文方法能够有效校正计算成像系统中的残留像差,提升图像质量. 关键词:图像处理;像差校正;成像系统;计算成像;大视场高分辨

中图分类号:TN911.73 文献标识码:A 文章编号:1004-4213(2015)06-0610001-6

Image Processing Technology Based on Color-separated Correction for Optical Imaging System with Aberrations

FENG Yan-chao, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai, LI Qi, CHEN Yue-ting (State Key Laboratory of Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Monocentric multiscale computational imaging system was used to solve the problems of high complexity and cost in traditional wide-field high-resolution camera. Image processing was used to correct the plenty of aberrations caused by the simplified optical system, especially the spherical aberration and the lateral chromatic aberration. The aberration characters were analyzed to get the imaging data. The image was processed separately in red, green and blue channels using the system parameters and the aberration manifestation. Firstly, a non-linear image scaling method was used to harmonize the magnifications of different colors so that the lateral chromatic aberration is corrected. Then, the blurred image of different channels was divided to sub-frame sections because of the space-variant point spread function of the optical system. The sub-sections were restored by Lucy-Richardson algorithm so that the monochromatic aberrations is corrected. At last, the images in red, green and blue channels were fused to be the corrected image. The imaging and correction process was simulated and the image quality was assessed by mean squared error, peak signal to noise ratio and structural similarity. The results show that the aberration caused by the computational imaging system can been corrected effectively and the image quality can been improved.

Key words: Image processing; Aberration correction; Imaging systems; Computational imaging; Widefield high-resolution

OCIS Codes: 100.2000; 110.1758; 100.1830

导师(通讯作者):冯华君(1963-),男,教授,博导,主要研究方向为成像技术和图像处理. Email:fenghj@zju.edu.cn 收稿日期:2014-12-11;录用日期:2015-01-28

基金项目:国家自然科学基金(No. 61475135)资助

第一作者:冯彦超(1989一),男,硕士研究生,主要研究方向为光学图像处理. Email:deedis@zju.edu.cn

0 引言

在传统光学领域,大视场和高分辨无法兼得, Lohmann^[1]从原理上解释了大视场高分辨光学系统的 内在制约因素,提出了用以描述透镜尺寸大小和光学 系统分辨率之间关系的比例法则.Brady^[2-3]与 Marks^[4]等研制了具有超大视场的同心多尺度相机 AWARE-2,该相机利用微透镜组来校正像差,并利用 计算机进行图像拼接,克服了单片探测器能力不足的 问题.然而,这种光学系统依然设计困难、体积臃肿、 成本巨大.

Krishnan 和 Nayar⁵³等采用大球镜系统,研制出 基于计算成像校正像差的同心多尺度相机,该相机简 化了光学系统设计,通过图像处理的方法来校正像差. Cossairt^[6-7]等将透镜系统的比例法则推广到了计算成 像领域,通过计算成像的方法校正一些像差,将信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR)作为图像质量的一个重 要参量,导出了计算成像系统的透镜比例法则. M D Robinson 与 D G Stork^[8]等从波像差的角度分析了光 学系统成像质量和透镜系统参量之间的关系,根据图 像原始调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)与目标调制传递函数,采用有限冲击响应滤波 器对图像进行去模糊处理得到清晰图片. Cossairt 和 Navar^[9]等还对计算成像系统的色差进行了研究,提出 了一种非精确的轴上色差校正方法,取得了较好的视 觉效果. 冯华君和陶小平[10-11]等基于光学成像特性对 高分辨图像复原技术进行了研究,提出了一种空间变 化点扩散函数(Space-Variant Point Spread Function, SVPSF)图像分块复原的拼接方法. 崔洪州^[12]等针对 大视场成像光学系统提出了基于畸变率的图像几何校 正方法. 卢惠民^[13]等提出了用于计算成像系统的基于 信噪比自适应估计的图像去模糊方法. 楼斌[14] 和狄红 卫[15]等对基于结构相似度的图像质量评价方法进行 了研究.

本文光学系统以球镜为基础,采用红、绿、蓝三通 道分别校正系统残留的大量像差.通过对图像各颜色 通道的非线性缩放来进行倍率色差的校正,针对各颜 色通道用图像分块复原方法进行单色像差的校正,最 后融合三通道获得彩色图像.

1 同心多尺度光学系统

以球镜为基础的同心多尺度光学系统由一个大球 镜与中继透镜阵列组成,如图 1. 最基础的计算成像系 统只用单球镜而无中继透镜,由于球镜具有对称性,系 统各个方向的光学性质相同,其像差与视场角无关. 然而考虑到探测器具有一定的尺寸和边缘,如只用单 球镜成像,则子图像之间存在缝隙,因此利用中继透镜 进行二次成像.当二次成像过程的放大率小于1时, 子图像之间就存在一定的重合区域,消除了缝隙,同时 也便于子图像拼接.因此,透镜阵列单元的设计必须 满足放大率要求,具体参量则由系统整体结构的设计 确定,另外,由于色差的严重性,可以尽量选用低色散 材料.



图 1 同心多尺度光学系统 Fig. 1 Monocentric multiscale optical system

在同心多尺度光学系统中,对于阵列中的不同单 元,它们的成像状况完全一致,从而其图像处理过程也 都是一致的.而对于单元内部,由于非球镜(中继透 镜)的存在,球对称性被破坏,其光学性质不再保持一 致,引入了与视场相关的像差.本文通过图像处理的 方式,对单元内部像差进行校正.

系统单元如图 2,每个单元承担 6°的视场,表1为 该单元的结构参量.显然,简化的光学系统中存在大 量像差.在7种初级像差中,畸变是由于不同视场放 大倍率不同而产生,表现为像的变形,由于本文光学系 统的单元视场很小,畸变可以忽略,因此并未进行校 正;倍率色差是由于不同色光的放大倍率不同而产生, 表现为像面上成像位置的不同,需要根据三通道的不 同成像特性来校正;位置色差是由于不同色光的像面 不同而产生,表现为不同大小的弥散斑,因而与其他4



图 2 同心多尺度光学系统的一个单元 Fig. 2 An unit of the monocentric multiscale optical system

表 1 光学系统单元的结构参量

 Table 1
 Prescription for the unit of the optical system

Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Semi-Diameter/mm
50.000	100.000	PMMA	50.000
-50.000	147.000	-	50.000
Infinity(STO)	0.999	-	2.302
13.361	1.621	CAF2	2.363
-19.247	20.641	-	2.337
Infinity(IMA)	-	-	0.700

0610001-2

种单色像差一起,归结到单色图像复原的问题.需要 注意的是,本文提出的像差校正方法是与光学系统相 关的,校正过程中所用的具体数据需要从光学设计中 获得.

2 像差校正

2.1 倍率色差的校正

不同色光具有不同的放大率,因此对于轴外同一 物点来说,不同色光对应不同的像点,彼此具有不同的 像高.图3为本文所用光学系统中红、绿、蓝三通道的 像高随视场角的变化.考虑到蓝色通道像高最小,为 便于后续处理,以蓝色通道作为基准.将红色通道、绿 色通道的像高曲线调整到与蓝色通道一致,具有一致 的放大率,那么倍率色差就能够得到校正.



图 3 三色像高曲线 Fig. 3 Curves of image height of RGB 红光、绿光的相对像高比例曲线为

$$k_{\rm r}(x) = \frac{r(x)}{b(x)} \tag{1}$$

$$k_{g}(x) = \frac{g(x)}{b(x)} \tag{2}$$

式中,r(x)为红光像高曲线,g(x)为绿光像高曲线, b(x)为蓝光像高曲线.图4为红光和绿光的相对像高 比例曲线.需要注意的是,轴上点的不同色像点均位 于轴上,即分子分母均为0,而该点数值在后续处理中



图 4 相对像高比例曲线



并不需要,因此为便于曲线拟合,令0°视场处的相对像 高比例取最邻近数据点的值.

对红色通道和绿色通道,根据校正前的图像和相 对像高比例曲线,可以分别得到新的校正后图像.具 体操作步骤为:

1)根据最大半视场(3°)处的相对像高,得到新图像的大小;

2)从新图像中取一个像元,计算其到图像中心的 距离,即其校正后像高,并且得到其与图像中心的相对 方位;

3)根据校正后像高,从相对像高比例曲线中插值 得到相对比例,计算出校正前像高;

4)根据校正前像高以及相对方位,在校正前图像 中找到对应的像元,以此对新图像的像元进行赋值;

5)对新图像中的每一个像元进行以上操作.

通过这种操作,新图像中的每一个像元可以通过 该曲线找到对应的像高比例,从而找到处理前图像中 对应的像元并得到赋值.对于亚像元的情况,则以上 下左右四个相邻像元的加权平均进行赋值.通过这种 非线性的图像缩放,将红光和绿光的的放大倍率都调 整到与蓝光一致,从而倍率色差得到校正.

另外,从图 3 也可以明显看到,本文所用光学系统 的单元在小视场条件下,三色像高曲线均保持了很好 的线性,即单元内部的畸变量很小.畸变曲线如图 5, 在最大的 3°视场处,红、绿、蓝三色的相对畸变分别为 -0.6519%、-0.8066%、-1.0477%,人眼对此没有 太明显的感觉.因此本文并未对畸变进行校正.



图 5 三色畸变曲线 Fig. 5 Curves of distortions of RGB

2.2 单色图像复原

对于理想的线性成像系统,成像过程可以表示为 原图像与点扩散函数的卷积,即

$$I(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u,v) P(x-u,y-v) dx dy \quad (3)$$

式中 *I* 为输出图像,*S* 为原图像,*P* 为点扩散函数,*u*,*v* 为物面坐标,*x*,*y* 为像面坐标.

实际光学系统的像差造成系统的点扩散函数是随

视场而变化的,因此其成像过程可以表示为 $I(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u,v)P(u,v,x-u,y-v)dxdy$ (4) 式中 I 为输出图像,S 为原图像,P 为点扩散函数,u,v 为物面坐标,x,y 为像面坐标.图 6 为本文所用光学系 统的红色通道点扩散函数随视场位置的变化情况.点 扩散函数图像的像元数均为 128×128,而大小分别为 173.07 µm× 173.07 µm(0°视场)、172.49 µm× 172.49 µm(1°视场)、170.75 µm×170.75 µm(2°视 场)、167.88 µm×167.88 µm(3°视场).可以看到,0°视 场处的点扩散函数具有中心对称的形状.而随着视场 的增大,这种对称性逐渐被破坏,在 3°视场处,点扩散 函数已经有了明显的变化.



图 6 红色通道的空间变化点扩散函数 Fig. 6 Space-variant PSF of the red channel

针对模糊图像的点扩散函数随空间变化的特点, 本文采用分块复原的方法,即按照光学系统点扩散函 数变化的规律将图像划分为不同的等晕区,在每个等 晕区中认为图像的点扩散函数是缓慢变化的,从而可 以用同一个点扩散函数对一个等晕区进行图像复原. 对于通常的光学系统而言,圆形-环形分块是一个比较 好的方式.然而在本文所采用的简化系统中,由于轴 外像差的影响,即使是距图像中心相同距离的区域,当 它们所处的方位不同时,其点扩散函数虽然在形状上 相同,但是却具有不同的方向.因此,本文使用矩形 分块.

分块数量则与图像视场大小有一定的关系,从根本上则是由与光学系统点扩散函数的变化情况决定. 一方面,需要保证子图像块内部的点扩散函数基本不变,因此分块越多自然更精确;而另一方面,过多的分块则增加了计算量,降低了效率,具体的分块数量需要 考虑具体针对的光学系统.由于本文所用光学系统的 视场较小,所以采用较少的9块就能得到稳定的块内 点扩散函数,而分成9块也能够比较直观地说明分块 和点扩散函数的选取情况.

根据分块距离图像中心的距离,以及所处的方位, 将每个通道的图像分为9块,如图7.图像的对角线代 表了单元的6°视场,对每一个分块均使用其中心点对 应的点扩散函数.其中块5使用0°视场的点扩散函 数,块2、4、6、8使用1.4°视场处不同方向的点扩散函 数,块1、3、7、9使用2°视场处不同方向的点扩散函数, 对每个图像块使用 Lucy-Richardson 算法进行反卷积 后拼接得到复原图像.



图 7 图像分块及点扩散函数的选取 Fig. 7 Sectioning of image and selections of PSFs

3 仿真与分析

利用 Zemax 软件的像模拟功能,可以得到光学系 统的成像结果.原图像的大小为687.9 μm×687.9 μm, 像元数为 78×78.可以看到,由于光学系统残留了大 量像差,成像质量非常差.将图像分为红、绿、蓝三个 通道,其对应的中心波长分别为 700 nm、546.1 nm、 435.8 nm.分别对不同的通道进行倍率色差的校正以 及单通道图像复原,结果分别如图 8~图 10.

表 2 为处理过程中各通道图像的质量评价数据, 包括均方误差(Mean Squared Error, MSE)、峰值信噪 比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)以及结构相似 度(Structural Similarity, SSIM),均以原图像作为参考



(a) Before correction



(b) After correction

图 8 红色通道校正结果 Fig. 8 Correction result of R channel



(a) Before correction



(b) After correction

图 9 绿色通道校正结果 Fig. 9 Correction result of G channel



(a) Before correction

图 10 蓝色通道校正结果 Fig. 10 Correction result of B channel

图像. 可以看到,经过校正后,各通道的图像质量都有 明显提升.其中,绿光作为中间波长,在光学设计过程 中得到了相对更好的优化,因此校正前图像质量相对 较好,校正效果并没有红、蓝两个通道明显,但从绝对 数据上看,三通道校正后皆更接近原图像. 将三通道 图像融合后得到彩色图像,即为最后的校正结果.

另外,采用经典方法对图像进行复原,即不分红、 绿、蓝三通道,而是对整幅图像采用一个三通道综合的 点扩散函数进行图像复原^[13].选择该光学系统 0°视场

	表 2 三通道校正图像质量评价	
Table 2	Quality assessment of corrected images in	3 channels

		e v		8		
	R channel before	R channel after	G channel before	G channel after	B channel before	B channel after
	correction	correction	correction	correction	correction	correction
MSE	0.154 9	0.032 9	0.028 4	0.015 5	0.093 3	0.019 0
PSNR	16.200 6	29.661 2	30.924 7	36.174 5	20.605 0	34.414 5
SSIM	0.996 7	0.999 4	0.999 5	0.999 7	0.998 2	0.999 6

处的综合点扩散函数,如图 11.



图 11 三通道综合点扩散函数 Fig. 11 Comprehensive PSF of RGB 两种方法的校正结果如图 12,其中图 12(a)为原 图像,图12(b)为经过光学系统所成的模糊图像,图12 (c)为本文方法的校正图像,图 12(d)为经典方法的校 正图像. 从图像上看,本文方法的校正结果比经典方 法更为清晰,而在色彩方面更是明显优于经典方法.



Fig. 12 Correction results

同时,采用图像 HSV 空间各个分量的结构相似度 来对两种复原结果进行评价,参考图均为原图像,评价 数据如表 3. 数据显示,通过本文方法校正后,图像在 色调、饱和度、亮度的表现上都更接近原图像,校正结 果优于经典方法.

表 3 校正图像的质量评价 Table 3 Quality assessment of corrected images

	Dl. mar d	Image corrected	Image corrected	
	Siurred	in separated	by classic	
image		channels	method	
H channel	0.940 8	0.969 1	0.965 7	
S channel	0.925 8	0.946 5	0.928 7	
V channel	0.997 0	0.999 1	0.995 6	

4 结论

本文针对同心多尺度计算成像系统,介绍了一种 通过图像处理来校正成像系统像差的方法.该方法采 用分通道处理的方式,利用非线性图像缩放以校正倍 率色差,利用分块复原进行单色图像复原.仿真结果 表明,该方法能够在极度简化的光学系统中,针对性地 校正成像像差,有效提升图像质量.与典型的采用三 通道综合点扩散函数复原的方法相比,本文方法的效 果更优.

参考文献

- LOHMANN A W. Scaling laws for lens systems[J]. Applied Optics, 1989, 28(23): 4996-4998.
- [2] BRADY D J, HAGEN N. Multiscale lens design[J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10659-10674.
- [3] BRADY D J, GEHM M E, STACK R A. Multiscale gigapixel photography[J]. Nature, 2012, 486: 386-389.
- [4] MARKS D L, SON H S, KIM J, et al. Engineering a gigapixel monocentric multiscale camera [J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 1-13.
- [5] KRISHNAN G, NAYAR S K. Towards a true spherical camera[C]. SPIE, 2009, 7240: 1-13.
- [6] COSSAIRT O S, MIAU D, NAYAR S K. A scaling law for computational imaging using spherical optics [J]. Journal of the Optical Society of America, 2011, 28: 2540-2553.
- [7] COSSAIRT O S, MIAU D, NAYAR S K. Gigapixel

computational imaging[C]. IEEE ICCP, 2011: 1-8.

- [8] ROBINSON M K, FENG G, STORK D G. Spherical coded imagers: Improving lens speed, depth-of-field, and manufacturing yield through enhanced spherical aberration and compensating image processing[C]. SPIE, 2009, 7429: 1-12.
- [9] COSSAIRT O, NAYAR S. Spectral focal sweep: extended depth of field from chromatic aberrations [C]. IEEE ICCP, 2010: 1-8.
- [10] FENG Hua-jun, TAO Xiao-ping, ZHAO Ju-feng, et al. Review and prospect of image restoration with space-variant point spread function [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(1): 1-7.
 冯华君,陶小平,赵巨峰,等. 空间变化 PSF 图像复原技术的研究现状与展望[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 1-7.
- [11] TAO Xiao-ping, FENG Hua-jun, LEI Hua, et al. A splicing method of sectioned restoration algorithm for images with space-variant point spread function[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 648-653.
 陶小平,冯华君,雷华,等. 一种空间变化 PSF 图像分块复原的拼接方法[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 648-653.
- [12] CUI Hong-zhou, KONG Yuan, ZHOU Qi-bo, et al. Image geometric correction based on distortion ratio[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3): 183-185.
 崔洪州,孔渊,周起勃,等.基于畸变率的图像几何校正[J].应用光学, 2006, 27(3): 183-185.
- [13] LU Hui-min, XU Ming, LI Xun. Image deblurring with adaptive signal-noise ratio estimation for computational imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0810002: 1-8.
 卢惠民,徐明,李迅. 用于计算成像系统的基于信噪比自适应估计的图像去模糊研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810002.1-8.
- [14] LOU B, SHEN Hai-bin, ZHAO Wu-feng, et al. Structural similarity image quality assessment based on distortion model
 [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(5): 864-868.
 楼斌, 沈海斌, 赵武锋,等. 基于失真模型的结构相似度图

接瓜, 化每瓜, 应氏律, 寺. 举于天具候望的结构相似度图 像质量评价[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, **43**(5): 864-868.

[15] DI Hong-wei, LIU Xian-feng. Image fusion quality assessment based on structural similarity[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 766-771.
狄红卫,刘显峰,等.基于结构相似度的图像融合质量评价 [J]. 光子学报, 2006, 35(5): 766-771.