

文章编号 1004-924X(2010)07-1511-09

基于眼模型的非球面眼底荧光相机的设计

王肇圻, 王尧, 全薇

(南开大学 现代光学研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要:运用非球面光学理论,设计了一款基于 Gullstrand-Le Grand 眼模型的便携式非球面眼底荧光相机。该相机根据滤光片选择原则,选用 Nikon 公司的 B-2A 滤光组合作为滤光系统进行光谱滤光;为避免角膜中心较大曲率引起的杂散光,采用环形光阑和共轴式照明相结合的照明方式实现眼底均匀照明;摄影系统中引入眼模型结构,综合校正了人眼及系统的像差,实现了全视场 20×10^6 pixel 的高清晰成像。该摄影系统包含有 2 个非球面结构,使系统由 9 片镜结构简化为 7 片镜结构。实验结果表明,该相机具有较大的调节能力,对 $-12 \sim +12 \text{ m}^{-1}$ 的人眼普遍适用,其视场角为 30° ,像面成像分辨率为 120 lp/mm,畸变值 $< 3.9\%$ 。非球面光学元件的使用,有效地简化了系统,减小了系统体积和重量,提高了成像质量。

关键词:光学设计;眼底荧光造影;相机;眼模型;非球面

中图分类号:TH703;TB853.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101807.1511

Design of aspheric FFA camera based on eye model

WANG Zhao-qi, WANG Yao, QUAN Wei

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology,
Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: By use of aspheric optical elements, a portable Fundus Fluorescein Angiography (FFA) camera is designed based on Gullstrand-Le Grand eye model. According to the principle of selecting filter, a B-2A filter combination from Nikon is used as the filter system to filter spectrum in this design, and the coaxial illumination system combined with an annular stop is designed to remove the stray light caused by a cornea to light the eyeground uniformly. An eye model is used in the design of photographic system to correct comprehensive aberrations from both the optical systems of human eye and the camera and to realize a high definition image with 2 mega pixels in all fields of view. The photographic system of the camera includes two aspheric surfaces, and it reduces the system from 9 lenses to 7 lenses. The result shows that this camera has strong ability for accommodation and adapts to different eyes from -12 m^{-1} to $+12 \text{ m}^{-1}$. The field of view of this camera is 30° , the resolution at the image surface is 120 lp/mm, and the distortion value is less than 3.9%. Because of the application of aspheric elements, the structure, volume and weight of the camera are optimized, and the image quality is improved.

Key words: optical design; Fundus Fluorescein Angiography (FFA); camera; eye model; aspheric surface

收稿日期:2009-09-01;修订日期:2009-11-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60978068; No. 60777011)

1 引言

眼底荧光相机是用来观察和拍摄眼底荧光造影(Fundus Fluorescein Angiography, FFA)的视光学仪器。自 Novotny 和 Alvis 于 1961 年首次成功拍摄人眼视网膜和脉络膜的循环动态过程以来,眼底荧光造影在眼科临床上迅速得到普及^[1-3]。这项检查可以反映出视网膜大血管至毛细血管的生理与病理情况,对眼底疾病的诊断及鉴别诊断具有十分重要的作用。眼底荧光造影的基本原理是采用荧光素钠作为造影剂注入被检查者的静脉内,造影剂随血液循环至眼底血管中,受蓝光的激发而产生黄绿色荧光;利用配有特殊滤光片组合的眼底荧光相机,观察并及时拍摄眼底血液循环的动态过程。目前国际上有多家厂商如 Kwoa, Canon 等,已经生产出形式多样的眼底荧光相机,但这些相机都是台式。

在进行光学系统设计时,若使用传统的球面镜设计,往往采取较为复杂的多片镜结构来满足系统要求,但这样光学系统的尺寸和重量都比较大。非球面的引入,增加了设计的自由度。与球面光学相比,非球面光学在减小镜头片数,减轻镜头质量,优化系统结构,提高成像质量等方面有更好的表现^[4-7]。同时,非球面加工与检验技术的日趋成熟,进一步为非球面在光学系统中的广泛应用提供了技术保证。

另外,以往的眼底荧光相机设计都只是针对相机自身的摄影系统进行像差校正,忽略了人眼像差的因素。实际上,人眼作为整个系统的 1 个组成部分,在眼底荧光相机的工作条件下,附带有较大的像差,从而影响眼底荧光相机的成像质量。

本文在眼底荧光相机的设计中,考虑了相机的实际应用环境,引入了普适的 Gullstrand-Le Grand 眼模型^[8-10]作为对人眼的模拟,综合校正了人眼及系统的像差。运用传统的球面镜设计思路,设计了 1 个 9 片镜的眼底荧光相机摄影系统。在此基础上,引入非球面,将原有系统简化至 7 片镜,有效减轻了镜头质量。本文设计的眼底荧光相机分辨率为 120 mm/lp,畸变 $<3.9\%$,具有较大的调节能力。

2 设计原理

2.1 眼底荧光相机的结构

一般的眼底荧光相机由滤光系统、照明系统、摄影系统和观察瞄准系统^[11-12]4 部分组成。

(1)滤光系统:眼底荧光相机中需要 2 块特殊组合的滤光片^[2]。1 块置于照明光路中,称为激发滤光片,它只允许荧光素的吸收光谱波长通过,而其他波长的光不能通过;另一块置于摄影光路中,称为屏障滤光片,它要求必须能让荧光素的发射光谱波长通过,而屏除由眼底反射出的非荧光素发射波长的光。1 个好的滤光系统要求 2 块滤光片在所需的光谱范围内的透过率高,且二者的光谱透过率的重叠区 $<1\%$,这样才可以避免假荧光的出现,从而获得清晰的造影图像。

(2)照明系统:采用了环形光阑和共轴式照明相结合的照明系统。在照明设计中使用环形光阑,使其成像于眼瞳上,形成环形亮斑,这样光线从角膜曲率半径较小的环形区域进入,避免了大量杂散光的产生。另一方面,共轴式照明中照明系统与摄影系统共用 1 组接目物镜,从而有益于减少杂散光,保证光照的均匀性。

3)摄影系统:摄影系统将眼底成像在 CCD 的接收靶面上。它包括接目物镜和成像物镜 2 部分,接目物镜为照明系统和摄影系统所共用,成像物镜还起着调焦的作用。

本设计采用 CCD 实时接收和 LCD 实时显示的方法,不需要特别的观察系统。

2.2 眼光学模型

2.2.1 Gullstrand-Le Grand 眼模型结构

在设计过程中,为了模拟眼底荧光相机使用的真实环境,引入了目前应用最广泛的 Gullstr-

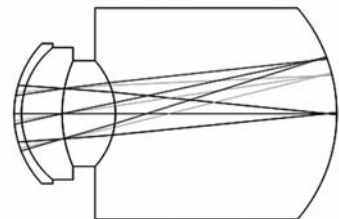


图 1 Gullstrand-Le Grand 眼模型结构

Fig. 1 Structure of Gullstrand-Le Grand eye model

and-Le Grand 眼模型。它由 4 个折射面构成,分别是角膜前后表面、晶状体前后表面。图 1 给出了 Gullstrand-Le Grand 眼模型结构,表 1 给出了其具体的结构参数。

表 1 Gullstrand-Le Grand 眼模型的结构参数

Tab. 1 Structural parameters of Gullstrand-Le Grand eye model

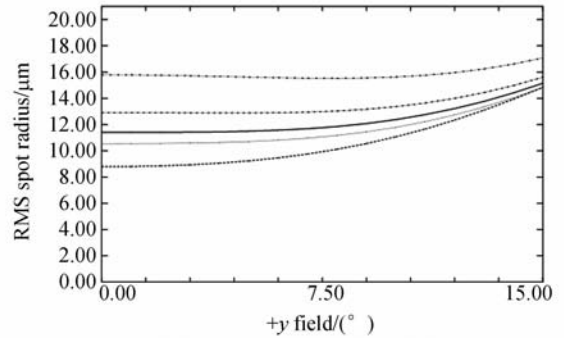
	Radius/mm	Thickness/mm	Index of refractive(n_d)
Cornea	7.8	0.55	1.377 1
Aqueous	6.5	3.05	1.337 4
Lens	10.2	4.0	1.42
Vitreous	-6	16.6	1.336
	-12.3		

2.2.2 人眼像差对成像质量的影响

Gullstrand-Le Grand 眼模型被广泛地用来研究眼睛的成像及像差特性,本文从理论上分析了眼睛的成像特性^[7]。用 ZEMAX 软件构建了 Gullstrand-Le Grand 眼模型,并分析了在眼底荧光相机的工作波段(500~580 nm,其中 525nm 为主波长)和不同瞳孔直径下的视网膜成像情况。通常眼底荧光照相需要在瞳孔直径为 4~5 mm 时照明和拍摄眼底图像^[3]。图 2 (a),(b)分别给出了瞳孔直径为 4 mm,5 mm 时,像点的弥散斑 RMS 半径值随波长及视场角的变化曲线。每个图中的 5 条曲线由上至下分别表示 580 nm,550 nm,复色光,525 nm,500 nm 波长下弥散斑 RMS 半径随视场角的变化。

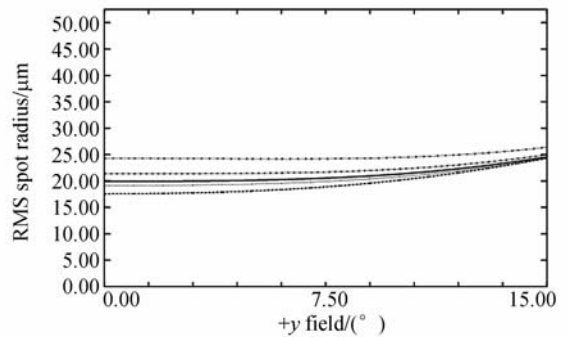
从图中分析可知,各波长 RMS 半径值都随视场增大而增大。其中主波长和复色光的 RMS 半径很接近,说明由于工作波段极窄且光谱具有特殊性,所以在本设计中人眼色差对成像质量的影响并不明显。从图中还可以看出,随着瞳孔直径的增加,RMS 半径在各个视场下均有显著增加。瞳孔直径为 4 mm 时,0 视场 RMS 半径值为 11.39 μm ,全视场 RMS 半径值为 19.92 μm ;瞳孔直径为 5 mm 时,0 视场 RMS 半径值为 15.14 μm ,全视场 RMS 半径值为 24.54 μm 。而视网膜清晰成像要求弥散斑半径接近 5 μm ^[9],如果不校正人眼的像差,在眼底荧光相机工作的瞳孔范围内的弥散斑半径 RMS 值远大于这个标准,因此

人眼像差对系统成像质量的影响不可忽略,系统设计中需要校正人眼像差。



(a) 4 mm 瞳孔时的弥散斑半径 RMS 值

(a) RMS spot radius with 4mm pupil size



(b) 5 mm 瞳孔时的弥散斑半径 RMS 值

(b) RMS spot radius with 5mm pupil size

图 2 不同瞳孔下弥散斑 RMS 半径随波长及视场角变化的曲线

Fig. 2 Curves of RMS spot radiuses with wavelengths and fields of view in different pupils

3 设计过程

3.1 设计要求

瞳孔大小: 3~7 mm,此为眼瞳的调节范围。
分辨率:像面 120 lp/mm。
尺寸:系统总长小于 250 mm,此为便携性的要求。

视场角:30°,这个视场角可以摄得视盘与黄斑的之间部分。

接收器:2.0×10⁶ pixel,1/2CCD。

照明:12 V,50 W 卤素荧光灯。

3.2 滤光系统选择

由于荧光素钠在眼底血管中的吸收波长为 475 nm,发射波长为 525 nm。根据滤光片选择的原则,本文选择了 Nikon 公司的 B-2A 滤光组合应用到本设计中,其光谱透过率如图 3 所示。激发滤光片为带通滤光片,屏障滤光片为高通滤光片,2 块滤光片在所选波长范围内的光谱透过率基本大于 80%,且基本没有重叠区域。

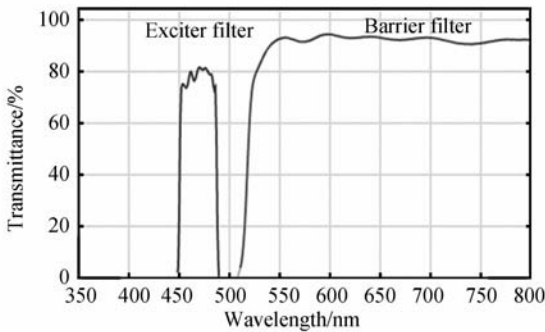


图 3 滤光系统的光谱透过率曲线

Fig. 3 Spectral transmittance of filter system

3.3 照明系统设计

照明系统采用共轴式照明,在照明光路中需要 1 个 45°中空反射镜,把通过环形光阑的照明光束反射到接目物镜上,最终环形光阑在眼瞳处成 1 个环形像,照亮眼底。眼底照相机通常需要在瞳孔直径为 4~5 mm 的情况下拍摄眼底图像。为了减小杂散光的影响,同时保证有充足的照明,本设计选择眼瞳处的环形光斑大小为内径 4 mm,外径 8 mm。设计中,波长权重按照激发滤光片光

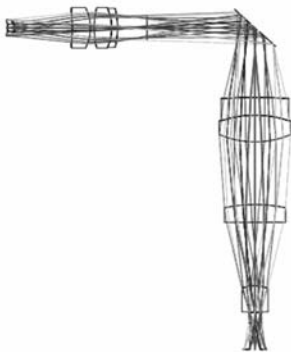


图 4 照明系统结构图

Fig. 4 Configuration of illuminating system

谱透过率设置,对聚光透镜组进行优化,得到最终的照明系统结构如图 4 所示。系统为反向设计,最左面的结构为人眼角膜,最下面为环形光阑。中空反射镜内径为 8.2 mm,外径为 30 mm;环形光阑内径 5.2 mm,外径为 12.4 mm。

3.4 摄影系统设计

3.4.1 初始设计

由于便携式的要求,本系统要求体积小,即需要成像物镜的初始模型焦距短,会聚快,尽可能地缩短整个系统的长度,最终选取了 Petzval4 片镜透镜组作为成像物镜的初始模型^[13]。接目物镜选取了 1 个视场角为 30°的 3 片透镜组。

在 ZEMAX 软件中将上述初始模型,眼光学模型,和滤光片拼接起来进行整体优化设计,并将系统总长控制在 250 mm 之内。在设计过程中,由于 Petzval4 片透镜组的第 1 片和第 2 片镜曲率刚好互补,因此合并为 1 个双胶合透镜,进一步又把这个双胶合透镜修改为 1 个三胶合透镜组。最后综合考虑照明系统的要求,对接目物镜进行必要的修改,再进行整体优化,最终得到了如图 5 所示的摄影系统结构,其中最后 1 片镜为屏障滤光片。



图 5 摄影系统结构图

Fig. 5 Configuration of photographic system

此摄影系统全长 159.4 mm,用 ZEMAX 软件模拟玻璃质量为 71.47 g。对于 -10 ~ +8 m⁻¹人眼,此系统均可进行清晰成像。

3.4.2 含非球面的改进设计

一般来说,非球面和二元衍射面的引入,都能在保证一定性能的条件下,有效地减小系统的尺寸和重量,系统的成像质量也能有所提高。2.2.2 节的讨论说明,本系统中色差的影响并不大,制约系统成像质量的主要因素是单色像差,因此考虑在摄影系统中引入非球面镜。

非球面是指表面各点半径都不相同的曲面,

目前设计常用的非球面是旋转对称偶次非球面,其方程为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_2 r^2 + \alpha_4 r^4 + \alpha_6 r^6 + \alpha_8 r^8 + \alpha_{10} r^{10} + \dots$$

其中, r 表示光线与曲面交点高度; c 表示非球面顶点曲率; $\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6, \alpha_8$ 等为高次非球面系数; k 与二次曲面的离心率有关, $k < -1$ 为双曲面, $k = -1$ 为抛物面, $-1 < k < 0$ 为椭球面, $k = 0$ 为球面, $k > 0$ 为扁平椭球面。

我国非球面的加工与检验技术日趋成熟,特别是计算机控制光学表面成形法(Computer controlled Optical Surfacing, CCOS)日益完善,已应用在轴对称非球面的加工中,10项以内的高次项有较高的加工精度。同时,干涉法、阴影法、光学补偿法等非球面检验技术不断完善,保证了非球面在光学系统中应用的可行性和实用性^[14-17]。

设计含非球面的摄影系统,可控制的参数变量除了曲率半径和厚度外,还有非球面系数。改进设计的主要工作是将9片镜摄影系统简化,三胶合透镜组是主要的替换对象。改进系统设计的主要步骤如下:

(1)将三胶合透镜的最后1片凸镜去掉,并把剩余2片镜变为双分离透镜。将靠近光阑的一面设为偶次非球面,并设置厚度,曲率半径,和非球面系数为变量,在优化函数中控制球差、场曲、畸变等单色像差进行优化。

(2)优化过程中发现畸变值过大,考虑在远离光阑的面增加1个非球面,重复上步的优化过程;

(3)最后1片凹镜的2个面在优化过程中曲率都很小,接近1个平行平板,对成像贡献不大,因此将它删除,对剩余的4片镜进行优化。

在设计过程中,考虑非球面加工和检验的因素,在对非球面系数进行优化时,仅设置二次曲面系数 k 为变量,以降低加工难度,保证加工精度并节约成本。经过反复优化及修改,原有的摄影系统简化为7片镜,如图6所示,包含2个二次非球面,和1片屏障滤光片,这个设计在现有条件下是完全可以实现的。

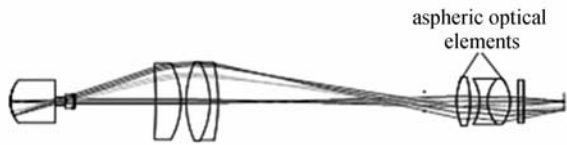


图6 改进后的摄影系统结构图

Fig. 6 Configuration of photographic system after improving

此系统全长152.4 mm,用ZEMAX软件模拟玻璃质量为51.74 g,比初始系统分别减少了7 mm和19.73 g,进一步满足了系统体积小,重量轻的要求。同时,对于 $-12 \sim +12 \text{ m}^{-1}$ 人眼,此系统均可进行清晰成像,比初始系统的调焦范围更大,且只需移动CCD即可实现。CCD的总移动量为3.49 mm,像面半径变化为 $-0.038 \sim +0.154 \text{ mm}$,二者变化范围均较小,不会引起系统放大率及像差的较大变化。

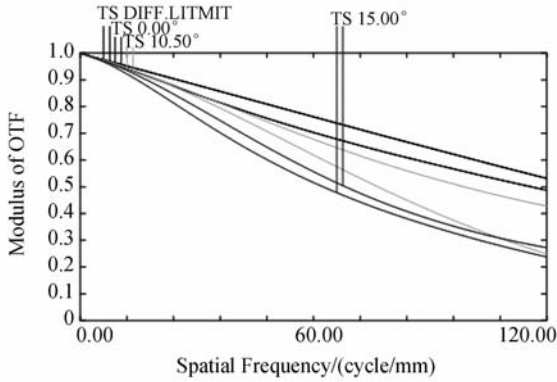
4 设计结果

4.1 摄影系统

本设计要求像面达到120 lp/mm的分辨率,以使眼底荧光造影的拍摄过程中获得清晰图像,便于准确地诊断眼底疾病。图7给出了摄影系统的部分特性曲线,(a)为MTF曲线。可以看出,在120 lp/mm处,0视场MTF值接近衍射极限,达到0.5,0.7和全视场的MTF值也都高于0.24,满足了分辨率的要求。(b)为畸变曲线。畸变为负,其值小于3.9%。(c)为物面上的点列图。其物面即视网膜上的0视场弥散斑RMS半径值为 $5.007 \mu\text{m}$,符合视网膜清晰成像的要求。0.7视场和全视场弥散斑RMS半径值分别为 $6.536 \mu\text{m}$ 和 $8.254 \mu\text{m}$,与人眼固有像差引起的弥散斑RMS半径值相比,也减小了许多。

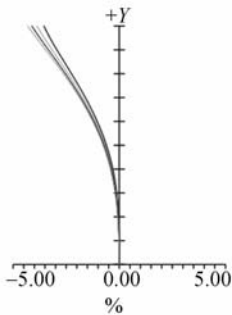
图8分别给出了初始系统与非球面改进系统像面上点列图,表2具体给出了点列图弥散斑RMS半径的数值。由于初始系统0视场的所有光线均在艾里圆环内,系统处于衍射极限状态,故其实际RMS半径值应与艾里斑相当,为 $4.163 \mu\text{m}$ 。对比0视场,0.7视场,及全视场的弥散斑

RMS 半径值,可以看出改进后的非球面系统有更好的成像质量,尤其是 0.7 视场及全视场的像质改进更为明显。



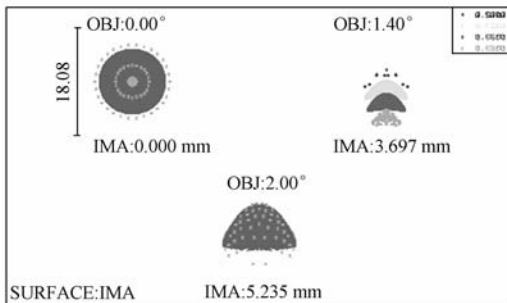
(a)摄影系统的 MTF 曲线图

(a)Curves of MTF of photographic system



(b)畸变曲线

(b)Curves of distortion

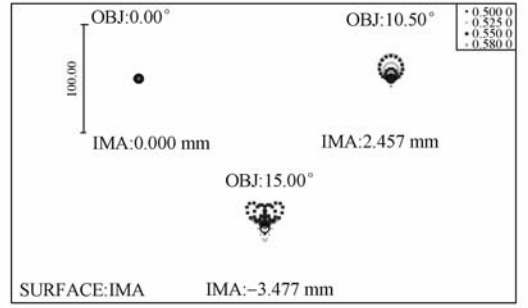


(c)物面点列图

(c)Spot diagram of object surface

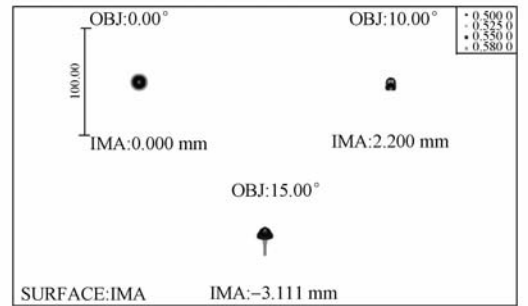
图 7 摄影系统的特性曲线

Fig. 7 Performance curves of photographic system



(a)初始系统像面点列图

(a)Spot diagram of image surface of initial system



(b)非球面系统像面点列图

(b)Spot diagram of image surface of aspheric system

图 8 初始系统与非球面系统像面点列图对比

Fig. 8 Comparison of spot diagrams of image surfaces of initial system and aspheric systems

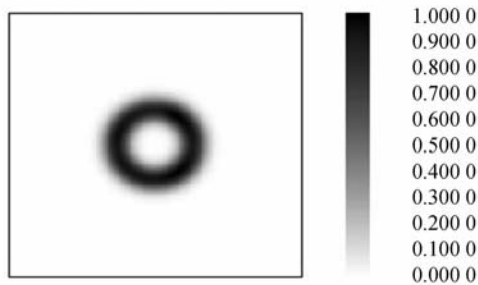
表 2 初始系统与非球面系统像面弥散斑 RMS 半径值对比

Tab. 2 Comparison of RMS spot radiuses of initial system and aspheric systems

	Initial system	Aspheric system
0 field/ μm	1, 655	3, 258
0.7 field/ μm	8, 456	3, 752
Full field/ μm	11, 552	5, 780
Radius of Airy disk/ μm	4, 163	3, 210

4.2 照明系统

图 9 给出了像面的相对照度,其中图(a)为用光线追迹的方法获得 0 视场时的像面照度分布图,图(b)~(e)分别为 +y, -y, +x, -x 方向上的相对照度曲线。由图可见,4 个方向上的相对



(a) 相对照度图

(a) Relative illumination

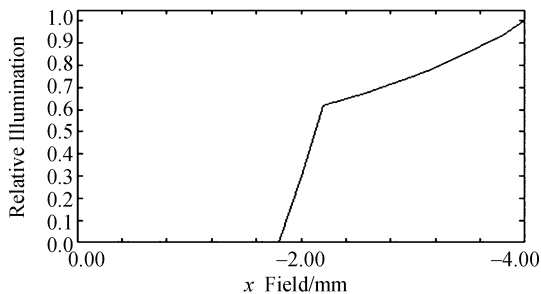
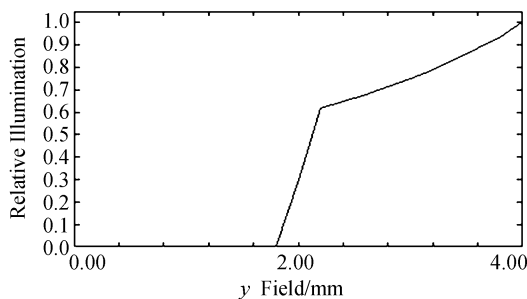
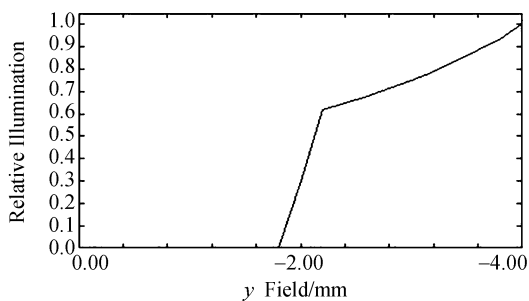
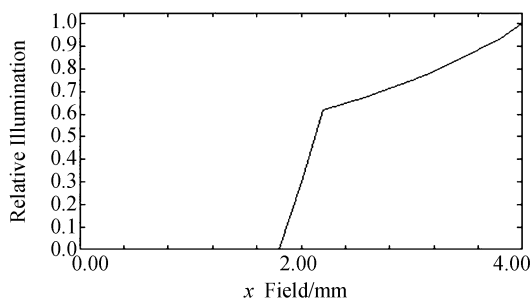
(e) $-x$ 方向相对照度曲线(e) Relative illumination of $-x$ field(b) y 方向相对照度曲线(b) Relative illumination of y field(c) $-y$ 方向相对照度曲线(c) Relative illumination of $-y$ field(d) x 方向相对照度曲线(d) Relative illumination of x field

图9 像面相对照度图

Fig. 9 Relative illuminations of image surfaces

照度曲线相似,形成了很好的环形照明,在外径 8 mm,内径 4 mm 的环形区域中,相对照度均大于 65%,符合眼底荧光相机的照明要求。

5 结 论

本文运用了非球面和传统球面镜设计相结合的方法,设计了一款便携式眼底荧光相机,实现了眼底的高清晰成像,符合 2×10^6 pixel, 1/2CCD 的分辨率要求。本设计从实际应用环境出发,引入 Gullstrand-Le Grand 眼模型作为整个系统设计的一部分,消除了人眼像差对光学成像质量的影响。非球面的运用,使系统更加轻便简单,并具有更好的成像性能。本系统视场角为 30° ,畸变 $< 3.9\%$,像面分辨率达到 120 lp/mm,同时具有更大的调焦能力,对 $-12 \sim +12 \text{ m}^{-1}$ 人眼普遍适用。

参考文献:

- [1] NOVOTNY H R, ALVIS D L. A method of photographing fluorescence in circulating blood in the human retina[J]. *Circulation*, 1961, 24: 82-86.
- [2] 梁树今, 廖菊生. 眼底荧光血管造影释义[M]. 石家庄: 河北人民出版社, 1980.
- LIANG S J, LIAO J S. *Interpretation of Fundus Fluorescein Angiography* [M]. Shijiazhuang: Hebei People Press, 1980. (in Chinese)
- [3] 吕帆. 眼视光器械学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004.
- LV F. *Optometry Equipment Study* [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [4] 郜洪云, 熊涛, 杨长城. 中波红外连续变焦光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1038-1043.
- GAO H Y, XIONG T, YANG C C. Middle infrared continuous zoom optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1038-1043. (in Chinese)
- [5] 王丽萍, 张立超, 何锋赞, 等. 采用多种群遗传算法的全景成像系统非球面设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1020-1025.
- WANG L P, ZHANG L C, HE F Z, *et al.*. Design of aspheric mirror for panoramic imaging system using multi-population genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1020-1025. (in Chinese)
- [6] ZHANG M, WANG Z Q. Design of an objective lens for womb electronic endoscope with high definition, non-blind spot and thinner outer diameter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 328-331.
- [7] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- ZHANG Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
- [8] 郭欢庆, 王肇圻, 赵秋铃, 等. 基于主观式测量人眼波前像差的眼模型研究[J]. *光子学报*, 2005, 34(11): 1666-1669.
- GUO H Q, WANG Z Q, ZHAO Q L, *et al.*. Eye model based on wavefront aberration measured subjectively [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(11): 1666-1669. (in Chinese)
- [9] MOUROULIS P. *Visual Instrumentation* [M]. New York: McGraw-Hill, 1999: 106-110, 277-280.
- [10] BLAKER J W. Toward an adaptive model of the human eye [J]. *Optical Society of America*, 1980, 70(2): 220-223.
- [11] 王肇圻, 许妍. 基于眼模型的数字眼底相机设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1567-1571.
- WANG Z Q, XU Y. Design of digital retina camera based on eye model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1567-1571. (in Chinese)
- [12] 许妍, 王肇圻, 田野. 基于眼模型的折/衍混合眼底相机设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(5): 1122-1125.
- XU Y, WANG Z Q, TIAN Y. Hybrid refractive/diffractive optical system design of a digital retina camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(5): 1122-1125. (in Chinese)
- [13] 王肇圻, 张轶楠, 傅汝廉, 等. 折/衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1): 1-4.
- WANG Z Q, ZHANG Y N, FU R L, *et al.*. Design of hybrid refractive/diffractive petzval objective in visible band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 1-4. (in Chinese)
- [14] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- PAN J H. *Aspherical Optical System Design, Fabrication and Testing* [M]. Suzhou: Soozhow University Press, 2004. (in Chinese)
- [15] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- YANG L. *Advanced Optical Manufacturing Technology* [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- [16] 王孝坤, 王丽辉, 张学军. 干涉法实时测量浅度非球面技术[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 184-189.
- WANG X K, WANG L H, ZHANG X J. Testing of weak aspheric surface by real-time interferometry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 184-

189. (in Chinese)

- [17] 薛栋林,张忠玉,郑立功. 大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2491-2496.

XUE D L, ZHANG Z Y, ZHENG L G. Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(12):2491-2496. (in Chinese)

作者简介:



王 尧(1984—),女,河北邯郸人,硕士研究生,2007年于天津大学获得学士学位,主要从事光学设计和眼视光学方面的研究。E-mail: minwooyoyo@yahoo.cn



全 薇(1964—),女,辽宁沈阳人,博士后,教授,2004年于南开大学现代光学研究所获博士学位,2008从南开大学物理学院博士后流动站出站,主要从事眼视光学方面的研究。E-mail: nkquanwei@163.com

导师简介:



王肇圻(1944—),男,山东牟平人,博士,研究员,博士生导师,1968年于北京大学获学士学位,1982年在南开大学获硕士学位,1995年在英国丹第阿巴特大学获博士学位,主要从事眼视光学、光学设计和信息光学等方面的研究。E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

●下期预告

光学镜面磁流变抛光的后置处理

宋 辞,戴一帆,彭小强,石 峰

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

在自研的磁流变抛光机床 KDMRF-1000 的基础上,通过分析机床的拓扑结构以及坐标变换关系,对机床进行了运动求解,建立了光学镜面的磁流变抛光后置处理算法模型。针对机床四联动的特点,对建立的磁流变抛光后置处理模型进行了近似处理。以球面镜的后置处理为例,推导了具有普适性的光栅扫描方式加工光学镜面的后置处理算法,同时分析了这种近似处理引入的误差,并且仿真了其对不同口径和不同相对口径球面镜的影响,得到了这种近似处理算法对球面镜的加工范围。最后利用一块口径 200 mm,相对口径 1:1.6 的 K9 材料的球面镜进行了磁流变抛光实验,在不考虑边缘效应的情况下其面形误差的 PV 值和 RMS 值分别达到了 65 nm 和 9 nm 以下,有效地验证了后置处理算法模型的准确性以及四轴联动近似处理的可行性,对各类形状和大小光学镜面加工具有重要的参考价值和指导意义。