

文章编号: 0258-7025(2006)03-0396-03

# 偏心摄影验光仪的空间变分析与数字模拟

刘 勇, 陈家璧

(上海理工大学光电学院, 上海 200093)

**摘要** 偏心摄影验光(EPR)是测量人眼屈光状态的一种简便方法。在分析偏心摄影验光仪中新月形的形成过程和瞳孔像的光强分布时,目前所有的方法都是利用几何光学理论并忽略光的衍射作用。为了提高理论分析的准确性,提出一种建立在波动光学基础上的空间变分析法,详细说明了形成新月形的空间变过程,并用计算机模拟出不同屈光度的近视眼瞳孔像及其沿子午方向的光强分布。对比几何光学理论的结论,该方法更为精确。

**关键词** 光学设计;偏心摄影验光;空间变分析法;点扩散函数;瞳孔

**中图分类号** O 439 **文献标识码** A

## Space-Variable Analysis and Simulation of Eccentric Photorefractometer

LIU Yong, CHEN Jia-bi

(Optical and Electronic Information Engineering College, University of Shanghai  
for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract** Eccentric photorefraction (EPR) is a technique for measuring the refractive state of the human eye. Up to now, the crescent formation and light-intensity distribution of the pupil image in eccentric photorefractometer are all analyzed by geometrical optical theory, and the diffraction effects are neglected. For improving the accurateness of theoretic analysis, a space variable method based on wave optics is presented. The creation of crescent is proved to be a space variable process, and the pupil image and the corresponding intensity distribution on the meridian for different myopic diopters are simulated by computer. The simulated results are compared with those obtained by geometrical optical theory and show that the method is more accurate.

**Key words** optical design; eccentric photorefraction; space variable analysis; point spread function; pupil

## 1 引 言

偏心摄影验光(EPR)是通过摄影手段测量人眼屈光不正的方法。快速简便、非接触和远距离操作等优点使它非常适合于婴儿和儿童的早期视力检查。Howland<sup>[1]</sup>利用几何光学对该技术作了理论分析,认为人眼的反射情况是眼睛屈光状态的函数,该函数取决于瞳孔的半径、光源的偏心率、相机光阑的大小以及瞳孔和相机间的距离。Roorda 等<sup>[2]</sup>运用建立在几何光学理论上的光线追迹法,推导出瞳孔像的光强分布轮廓,并且分析了色差对光强分布轮廓的影响,提出获得更高测量精度的方法。Kusel 等<sup>[3]</sup>利用高斯光学,在假设视网膜是各向同性的散

射体的条件下,分析了偏心摄影验光仪的结构(点光源、长线光源、刀口光阑和圆形光阑)对瞳孔像的光强分布的影响,指出在不同情况下应注意的问题和解决方法。总之,他们都是在几何光学的基础上对瞳孔像的光强分布进行理论分析。

本文提出了一种新的分析新月形的形成和瞳孔像的光强分布的方法。在偏心摄影验光仪中,由于光路系统的有效光阑随瞳孔上点的位置发生变化,该系统不同于通常所见的线性空间不变系统。对于这种情况,利用以波动光学<sup>[4]</sup>为基础的空间变分析法是很有必要的。在分析过程中,除了考虑光的衍射作用外,还要利用 Kusel 等<sup>[3]</sup>所提出的假设,说明新月形瞳孔像的形成过程,并得到其光强分布表达

收稿日期:2005-07-08;收到修改稿日期:2005-11-08

基金项目:国家 973 计划(2005CB724304)资助项目。

作者简介:刘 勇(1976—),男,江西宜春人,上海理工大学光电学院博士研究生,主要研究方向为光学系统的理论研究和设计。E-mail:liuyong7612@sina.com

式。进而,对于不同屈光度的近视眼,给出瞳孔像的光强分布模拟图,以论证空间变分析法的可行性。

## 2 偏心摄影验光的空间变模型

图 1 是偏心摄影验光仪测量近视眼的几何模型。假定图 1 中被测眼光轴与 CCD 相机光轴共轴,且点光源位于 CCD 照相机的光阑平面上。当点光源发出的光经过瞳孔照射视网膜时,在视网膜的被照明区上后向散射光将返回瞳孔。由于后向散射光在各个方向具有相同的光强分布,所以眼睛瞳孔上各点的光照度相等。又因为视网膜和远点面对于人眼系统是互相共轭的,经过瞳孔上各点的后向散射光一定会落在从点光源到瞳孔的照明光锥与远点面的交界面内,且在远点面上形成被照明视网膜的中间像。假定瞳孔是圆形,而且点光源的偏心率  $h$  远远小于瞳孔和 CCD 光阑面之间的距离  $l$ ,则被照视网膜在远点面的中间像为圆形。如图 1 所示,在远点面上中间像的半径  $R_i$  和中心坐标  $(x_{i0}, y_{i0})$  应该是

$$R_i = \frac{b}{2} \frac{l-r}{l}, \quad x_{i0} = h \frac{r}{l}, \quad y_{i0} = 0, \quad (1)$$

式中  $b$  为瞳孔的半径,  $r$  为远点面与瞳孔间的距离。

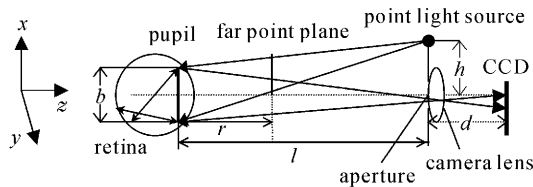


图 1 对近视眼进行偏心摄影验光的几何模型

Fig. 1 Optical geometry of eccentric photorefracton for a myopic eye

当把瞳孔上任意一点看作点光源时,它发出的所有光线必定经过视网膜的中间像,但是各条光线的传播方向是不同的。因此,对于瞳孔上的任意一点而言,不同点对应着不同的投影光锥。它在 CCD 光阑面上的投影圆的中心坐标  $(x_{10}, y_{10})$  和半径  $R_1$  应该为

$$x_{10} = x_0 \left(1 + \frac{l}{r}\right) - h, \quad y_{10} = y_0 \frac{r-l}{r}, \quad R_1 = \frac{l-r}{2r} b. \quad (2)$$

CCD 相机有效光阑实质上是 CCD 相机光阑与投影圆的重叠部分,也随着瞳孔上点的位置变化。当后向散射光通过 CCD 相机光阑时,光要发生衍射。对于瞳孔上的不同点,相应投影光锥的变化使得光经 CCD 相机光阑的衍射情况不同,这就导致

CCD 探测的光强分布模式的变化。瞳孔上不同点对应的光强分布模式的叠加就构成最终的新月图形。正是由于经过瞳孔上不同点的散射光有不同的传播方向,CCD 相机的有效光阑才会随瞳孔上点的位置变化,所以偏心摄影验光仪的光路不同于通常的线性空间不变成像系统,是一个空间变的系统。因此,CCD 相机成像过程不能表示成二维卷积形式,而必须用叠加积分来表示,即

$$I_i(x_i, y_i) = \iint_{\infty} I_0(x_0, y_0) h_1(x_0, y_0; x_i, y_i) dx_0 dy_0, \quad (3)$$

式中  $I_0(x_0, y_0)$  为瞳孔上的光强分布,  $(x_0, y_0)$  为瞳孔上的点位置坐标,  $(x_i, y_i)$  为 CCD 上的点位置坐标,  $h_1(x_0, y_0; x_i, y_i)$  为相对点  $(x_0, y_0)$  的 CCD 相机点扩散函数。由于  $h_1(x_0, y_0; x_i, y_i)$  不是取决于瞳孔和 CCD 位置坐标的差值而是依赖两者具体空间位置,所以它是空间变点扩散函数。

后向散射光的相位在瞳孔上的分布是二维随机过程,所以瞳孔上的光强分布也是个二维随机过程。这说明瞳孔上的后向散射光没有空间相干性,CCD 相机点扩散函数可以写成相干点扩散函数模的平方

$$h_1(x_0, y_0; x_i, y_i) = |h_c(x_0, y_0; x_i, y_i)|^2, \quad (4)$$

式中 CCD 相机的相干点扩散函数  $h_c$  为 CCD 相机镜头出瞳的傅里叶变换,即

$$h_c(x_0, y_0; x_i, y_i) = K \iint_{\infty} P(x_1, y_1) \times \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda d} [(x_i - Mx_0)x_1 + (y_i - My_0)y_1]\right\} dx_1 dy_1, \quad (5)$$

式中  $K$  为复常数,  $M$  为 CCD 相机的放大率,  $\lambda$  为入射光的中心波长(假定点光源是准单色光),  $d$  为 CCD 相机的出瞳到像面的距离,  $x_1$  和  $y_1$  表示 CCD 镜头出瞳的空间坐标,  $P(x_1, y_1)$  为 CCD 镜头的出瞳函数。为了分析简便,假定 CCD 相机镜头是薄透镜,则 CCD 相机出瞳在相机镜头上,出瞳函数等于式(2)决定的有效光阑,因此,它也是空间变的。

## 3 数字模拟

假定瞳孔上的光强均匀分布,以下数字模拟所采用的参数是:人眼瞳孔半径为 6 mm; CCD 相机镜头的焦距为 135 mm,直径为 27 mm; CCD 相机和瞳孔间的距离为 1 m;点光源偏离系统光轴 6 mm;光阑为 2 mm × 27 mm 的矩形狭缝,而且其长边与轴  $y_1$  平行。

模拟结果如图 2 所示。从中可以发现,当近视眼的屈光度增加时,新月形的宽度也随着增大,而且光强最大值区域远离新月形的边界。这说明偏心摄影验光可以测量人眼屈光不正。在垂直瞳孔像子午

方向上,图 2(a),(b)显示光强接近均匀分布,而图 2(c),(d)显示光强从最大值区域向边界递减。这些结论和利用几何光学原理所获得的新月形瞳孔像<sup>[5~7]</sup>相似,同时显示出光强分布的显著区别。

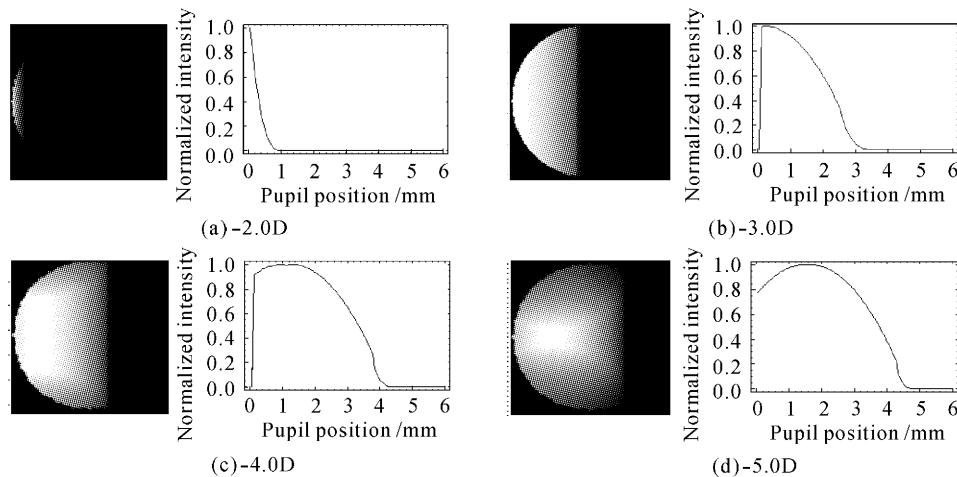


图 2 近视眼在不同屈光度下的新月形和新月形沿子午方向归一化的光强分布

Fig. 2 Crescent at different myopic diopters and the normalized intensity on the meridian of the images

在图 2 所示的各种情况中,对于经过瞳孔上不同点的后向散射光而言,它在 CCD 相机镜头上的投影圆的位置或半径变化或两者同时变化,导致 CCD 相机的有效光阑即投影圆与矩形狭缝的重叠面积的变化,这意味着在偏心摄影验光仪中光路系统的有效光阑是空间变化的,不同于常见的线性空间不变系统。当散射光经过不同光阑时,不同的衍射作用使散射光在 CCD 像面上的光强分布发生改变,不同的衍射光强叠加就形成瞳孔像的新月形。然而,以几何光学原理为基础的分析方法都忽略了光的衍射作用,其精度要比空间变分析法的低。事实上,瞳孔像上的光强分布取决于点光源的位置、被测瞳孔的半径、被测人眼的屈光度以及 CCD 相机镜头与瞳孔之间的距离。在实际应用中,这些参数的合理选择可以提高测量精度。

## 4 结 论

利用一种建立在波动光学基础上的方法分析点光源照明下新月形的形成和瞳孔像的光强分布。考虑到 CCD 相机的有效光阑是变化的,偏心摄影验光仪的光学系统可以用光的波动理论分析。由于 CCD 相机的光阑和散射光投影圆的重叠面积,即系统的有效光阑,可能非常小,光阑衍射作用不能忽略。另一方面,由于瞳孔上不同点散射的光的传播

方向不相同,偏心摄影验光仪光学系统的有效光阑是空间变的,不能用通常的线性空间不变方法做全面分析。

数字模拟结果显示了通过空间变分析法所获得的瞳孔像的光强分布,它类似于利用几何光学所获得的结果。这说明空间变分析法在偏心摄影验光中是可行的。因为考虑了衍射作用,偏心摄影验光的空间变分析法有更高的精度。此外,本文也为其他空间变的光路系统提供了一种新的分析方法。

## 参 考 文 献

- 1 H. C. Howland. The optics of static photographic skiascopy [J]. *Acta Ophthalmol*, 1980, **58**(2):221~225
- 2 A. Roorda, M. C. W. Campbell, W. R. Bobier. Geometrical theory to predict eccentric photorefractive intensity profiles in the human eye [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(8):1647~1656
- 3 R. Kusel, U. Oechsner, W. Wesemann *et al.*. Light-intensity distribution in eccentric photorefractive crescents [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(6):1500~1511
- 4 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. 2nd edition. New York: McGraw-Hill Press, 1996. 60~64
- 5 Xiangning Li, Liner Zou, Longyun Xu *et al.*. Optical analysis for light intensity distribution in EPR with different light sources [C]. *SPIE*, 2002, **4927**:239~244
- 6 Ying-Ling Chen, Bo Tan, J. W. L. Lewis. Simulation of eccentric photorefractive images [J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(14):1628~1642
- 7 Xiangning Li, Xiaoru Li, Hanwen Liu *et al.*. Intensity distribution topography on pupil's image in EPR [C]. *SPIE*, 2005, **5638**:27~35