

doi: 10.3788/gzxb20164510.1022001

带有波前编码板的虹膜采集光学系统的设计

张继艳^{1,2}, 黄元庆², 熊飞兵¹

(1 厦门理工学院 光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024)

(2 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361000)

摘 要:设计了一款采用波前编码技术的虹膜采集光学系统,以实现大景深、自然非约束状态下的成像。以传统的光学系统评价指标斯特利尔比和能量集中度作为波前编码系统的成像特征,利用 ZEMAX 软件对波前编码系统进行设计,权衡了离焦不敏感性和图像可恢复性。比较了带有立方相位编码板和带有修正项的立方相位编码板的虹膜采集系统以及传统系统的焦深延拓效果。发现采用立方相位编码板的虹膜采集光学系统的焦深延拓效果最佳,其焦深是传统系统的 8 倍。该系统增大了虹膜采集的距离,对于自然状态虹膜成像系统设计有一定的参考价值。

关键词:生物识别;景深扩展;波前编码;虹膜识别;成像系统

中图分类号:O438.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)10-1022001-7

Iris Acquiring Optical System Design with Wavefront Coding

ZHANG Ji-yan^{1,2}, HUANG Yuan-qing², XIONG Fei-bing¹

(1 Institute of Optoelectronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China)

(2 School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361000, China)

Abstract: An iris acquiring optical system with wavefront coding technique was designed, which can increase the depth of the field and get image at natural state without restriction. By applying the conventional imaging evaluation metric, Strehl ratio and encircled energy were used as the imaging features, and the wavefront coding system was design with ZEMAX, then a better trade-off between insensibility to defocus and restorability was obtained. The depths of focus of the system with cubic phase mask and modified cubic phase mask and the conventional system were compared. The result suggests the depth of focus of the iris acquiring system with cubic phase mask is the best which can attain by a factor of 8 over conventional iris acquiring system. The design increases the distance of the iris acquiring which has some reference value to the design of the iris image acquiring system at natural state.

Key words: Biometric identification; Extended depth of field; Wavefront Coding; Iris recognition; Imaging system

OCIS Codes: 220.3620; 070.0070; 170.3880; 110.7348; 200.4560

0 引言

虹膜识别是目前广泛应用的生物识别手段,因为它的检测具有非接触性和高可靠性,虹膜自身的稳定性不会随着年龄及疾病的改变而变化,所以其防伪性极高,可以提供高准确度的身份识别^[1-2]。由于虹膜本

身面积很小,细节特征较多,为了获得高分辨率的图像,要求光学系统具有较大的放大倍率,同时需要较大的通光孔径来保证图像的亮度。通光孔径越大,系统景深越小,因而精确调焦存在一定的难度,采集时需要用户的大量配合操作以捕获聚焦虹膜图像,给使用者带来极大的不便。所以现在亟需一种在离焦的情况下也

基金项目:福建省自然科学基金(No. 2016J01684)和福建省教育厅 A 类项目(No. JA12242)资助

第一作者:张继艳(1977-),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为光学系统设计、信息光学和颜色光学。Email: jyzhang@xmut.edu.cn

导师(通讯作者):黄元庆(1949-),男,教授,博士,主要研究方向为激光仪器工程、光电子技术、光通信与光电测控技术。Email: yuanqinghuang@xmu.edu.cn

收稿日期:2016-04-11; **录用日期:**2016-07-15

<http://www.photon.ac.cn>

能进行虹膜识别的虹膜采集成像系统。大景深的虹膜采集系统是理想之选。扩大景深的方法有许多,其中一种方法是增加 F 数,减小光瞳的大小,但是这样会产生两个问题:1)由于衍射会减小成像系统的分辨率,也减小了传感器捕获的光通量,因此会影响到图像的信噪比;2)通过增加曝光时间获得较高的亮度水平,增加曝光时间,会引入运动模糊,随着曝光的持续增加,人眼很难保持一动不动^[3-4]。人头部的轻微晃动会造成运动模糊,这对于后续虹膜分割及识别是非常不利的。

天津大学的王向军、张敏提出了非接触式虹膜图像获取系统的设计^[5],采用依靠几何光辅助照明实现非接触虹膜图像采集的方法,需要使用者眼睛放到合适的位置从而实现定位。林斌、汪林峰等^[6-7]利用聚焦评价算法,用电机驱动镜头来实现自动聚焦,但这需要一种快速有效的聚焦评价算法,并且系统较复杂,用户在采集过程中稍微移动就会使聚焦失败,无法达到预期的采集效果。苑玮琦、金爽^[8]设计了一款焦距为 9mm 的虹膜采集系统,拍摄距离是 50 mm,拍摄物距短,限制了用户使用的自由度,需要用户将眼睛放在正确的成像位置来成像,造成了使用上的不便。美国 Holo Spex 公司的 Grant J^[9] 和美国 CDM Optics 公司 Narayanswamy R^[10] 分别设计了不同的三次相位掩模板,用波前编码 (Wavefront Coding, WFC) 成像技术减少虹膜采集系统对离焦的敏感度,延拓了系统的景深。

本文设计的虹膜采集光学系统的镜头焦距是 50 mm,拍摄距离是 250 mm,使用波前编码技术,扩大了系统的景深,符合自然采集虹膜成像的理念,用户不需要将眼睛反复尝试放在正确的位置上。

1 波前相位编码技术

波前相位编码技术是 1995 年由美国 Colorado 大学的 Dowski 和 Cathy 首先提出的^[11]。采用立方相位编码板对置于光瞳上的光学系统的波前进行编码,从而获得一个大焦深的中间像,但是中间像是模糊像,还要经过后续的数字图像处理技术进行滤波还原和加强等处理,这项技术有很好的景深延拓的效果。其工作原理如图 1。

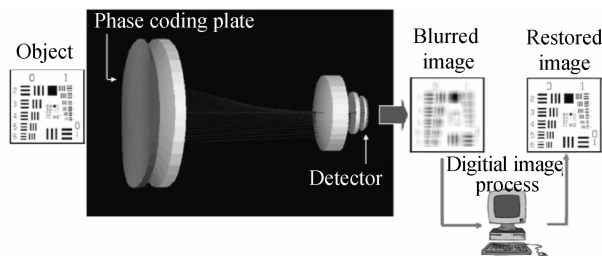


图 1 波前编码系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of the wavefront coding system

目前在光学设计中广泛使用的是立方相位编码

板,其相位板的解析解可以通过模糊函数和稳相法得到。立方相位编码板的面型函数为

$$z = a(x^3 + y^3) \quad (1)$$

其外形轮廓如图 2。除了立方相位编码板,还有对数相位编码板、指数相位编码板等^[12-13]其它类型的相位编码板。如何设计相位板和对相位板进行评价,是目前面临的主要问题^[14-16]。

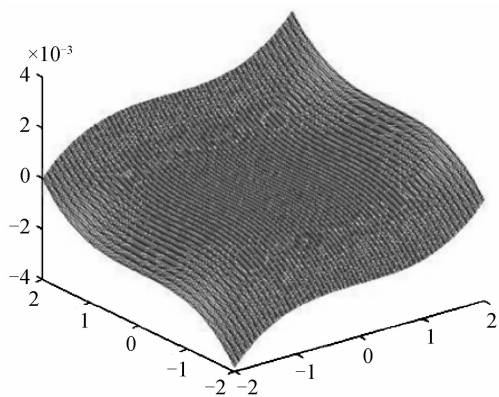


图 2 立方相位编码板外形轮廓

Fig. 2 The profile of the cubic phase mask

一般旋转对称系统相位编码板的能力有限,得不到希望扩展的焦深范围,所以本文采用普遍使用的立方相位编码板。立方相位编码板的广义光瞳函数 $P(x)$ 可以表示为

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp [ia(x^3 + y^3)] & |a| \gg 20 \\ 0 & \end{cases} \quad (2)$$

式中, a 是相位偏移程度的参量,结合傅里叶光学的知识以及模糊函数和稳相法,根据式(2),系统的光学传递函数可以表示为

$$H(u, \varphi) \approx \begin{cases} \left| \frac{\pi}{12au} \right|^{1/2} \exp \left(\frac{iau^3}{4} \right) \exp \left(i \frac{\varphi^2 u}{3a} \right) & u \neq 0 \\ 1 & u = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\varphi = kW_2$ 为离焦参量,从式(3)中可以看出,相位因子由两项组成,第一项是离焦参量 φ 无关的相位因子 $\exp \left(\frac{iau^3}{4} \right)$,第二项与频率参量 u 成正比,同时和离焦参量 φ 成平方关系,第二项相位与强度因子 a 成反比,即当 a 越大时,第二项的值越小,从而可以弱化第二项的影响。在 a 值较大的情况下,式(3)可以简化为

$$H(u, \varphi) \approx \begin{cases} \left| \frac{\pi}{12au} \right|^{1/2} \exp \left(\frac{iau^3}{4} \right) & u \neq 0 \\ 1 & u = 0 \end{cases} \quad (4)$$

2 系统设计

虹膜识别系统的表现很大程度取决于虹膜采集系统获得的虹膜的纹理,这需要虹膜在采集系统的焦深之内。因此,具有大焦深的虹膜采集系统可以提供很大的灵活性和鲁棒性。

本文设计了一款长焦距的可实现焦深延拓的虹膜采集系统。景深与焦深在一个系统中研究,只研究其一,大景深即对应着大焦深,无需重复研究。根据 ISO/IEC 1979-4 的规定,整个虹膜分辨率要大于 150 个像素才能确保可以接收的成像质量,故选择传感器尺寸为 1/2 英寸的成像 CCD,所选靶面大小为 4.8 mm×6.4 mm,像素数为 1024(H)×768(W)。成年人虹膜的尺寸大约是 10 mm,镜头拍摄的范围为 15~25 mm,传统虹膜相机的拍摄物距为 50 mm,自然状态成像系统要求虹膜拍摄的物距要使人感觉舒适而且不需要人的主动配合,设计选择的拍摄距离为 250 mm。由于成像空间的景深变大,用户不用将眼睛反复尝试放在正确的位置上,景深的扩展可以极大改善小景深造成的成像限制。图 3 为镜头成像示意图,焦距的选择要考虑被摄物体的大小及该物体到镜头距离,所需镜头的焦距为

$$f = \frac{wD}{W} = \frac{hD}{H} \quad (5)$$

式中, f 为镜头焦距, D 为被摄物体到镜头的距离, w 和 h 是被摄物体在传感器靶面上成像的宽度和高度,而 W 和 H 是被摄物体的宽度和高度^[17]。传感器上捕获的眼图要大到足够覆盖整个眼睛的区域,充分捕获眼周的特征,增强识别系统的稳定性。成年人眼周的大小区域范围大约为 40 mm。最终计算该镜头的焦距 $f = 50$ mm,所需的成像系统的放大率约为 0.256,采用红外 LED 照明,波长为 0.768 μm 。

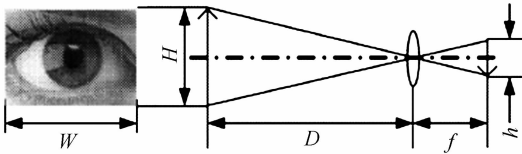


图 3 镜头成像示意图

Fig. 3 The schematic diagram of imaging lens

计算由焦距及物距所决定的成像系统的视场范围,带入数值计算得到的水平视场角 θ_{oh} 为 7.3°,垂直视场角 θ_{ov} 为 5.5°,考虑到眼周的尺寸决定的视场大小,最终确定物方视场角为 10°。系统的焦深(Depth of Focus, DOF)经过公式计算为 $\pm 2\lambda F^2 = \pm 0.0138$ mm。

所设计虹膜采集成像系统的性能参量见表 1。

表 1 虹膜采集成像系统的性能参量

Table 1 The specification parameter of iris capture imaging system

Parameter	λ/mm	f/mm	$F/\#$	FOV/(°)	DOF/mm
Value	768	50	3	± 5	± 0.0138

具体设计步骤为:首先,在加入相位编码板之前,通过修改曲率半径、厚度和透镜的位置来优化光学系统的初始结构,这样可以避免大的像差对波前编码成像的破坏。其次找到系统的光阑面,然后在该位置加入相位编码板,通过设定相应的初始值,在评价函数中设

定离焦不敏感的评价函数等手段,优化整体光学系统,实现等模糊像,进而实现焦深扩展。设计透镜的外形轮廓如图 4,第二片透镜采用相位编码板。相位编码板采用 Acrylic 材料,折射率是 1.4917,阿贝数是 55.3,厚度为 1.5 mm。

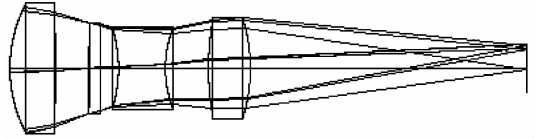


图 4 带有立方相位编码板的虹膜成像光路

Fig. 4 Layout of the designed iris imaging system with cubic phase mask

3 相位板参量优化及成像模拟

2003 年 Prasad, et al 引入了光瞳相位工程的概念,斯特列尔比 (Strehl Ratio, SR) 作为优化相位板参量的方法得到了广泛的研究,但是这种方法是在理想情况下,即只考虑离焦的情况下来优化相位板参量^[18-19]。斯特列尔比是以离焦为函数的泰勒级数的展开,优化以泰勒级数系数最小化为目标。然而实际光学系统的情况较为复杂,只用最理想的情况来优化是不合适的。所以采用实际光学系统设计中光学性能参量,通过软件自带的评价函数并考虑实际设计中的像差及视场,优化斯特列尔比得到最佳的相位板参量。

斯特列尔比的定义是光学系统有像差时衍射光斑的中心点亮度和没有像差的中心点亮度之比,主要用来表示带像差的光学系统点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 的中心点强度和理想光学系统中心点强度的相对变化,即

$$S = \frac{I_{\text{PSF}(0,0)}^{\text{with-aberration}}}{I_{\text{PSF}(0,0)}^{\text{without-aberration}}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{OTF}_{(\xi, \eta)}^{\text{with-aberration}} d\xi d\eta}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{OTF}_{(\xi, \eta)}^{\text{without-aberration}} d\xi d\eta} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,优化斯特列尔比就是要求得使斯特列尔比取得最大稳定值时的参量 a ,可以在整个焦深范围内选定几个有代表性的离焦位置,通过合理设置评价函数,使评价函数达到局部最优值。考虑到中间像可恢复性,设置软件评价函数的时候要加上一个惩罚函数,使斯特列尔比不致过低。ZEMAX 软件自带系统的斯特列尔比数据表示调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 的一次积分,其评价函数的设置为

$$\text{MF} = W_i \left[\text{STD}(\{S_{\text{ZF}}\}) + \frac{W \times (S_{\text{th}} - S_{\text{min}})}{K} \right] + W_j \text{DMF} \quad (7)$$

式中,STD是斯特列尔比的标准偏差, S_{zf} 是所取各离焦及各视场位置的斯特列尔比, W 和 K 是常量,评价函数中间一项是惩罚函数, S_{\min} 代表斯特列尔比的最小值, S_{th} 代表阈值,系统斯特列尔比的最小值低于阈值时,会计算中间一项的惩罚项, W_i 和 W_j 代表优化的权重.优化结束,光学系统的斯特列尔比是最大最稳定的,在所需要的焦深范围内,可以获得最好的参量.

3.1 立方相位编码板的设计

任何相位编码板都有一个或几个可变的参量,估算正确的相位编码板的参量就是优化相位编码板.设计采用ZEMAX软件自带的扩展多项式面型作为立方相位编码板的面型函数,扩展多项式的具体参量为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^9 A_i E_i(x, y) \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^9 A_i E_i(x, y) = a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2 + a_6 xy^2 + a_7 x^2 y + a_8 x^3 + a_9 y^3 \quad (9)$$

采用ZEMAX软件中自带的评价函数操作数STRH和DENC,取定一些特殊的特征点,计算其斯特列尔比和能量集中度的值,配合软件自带的默认评价

函数,通过求取评价函数的最小值,可求得相位板的强度因子 a ,考虑到系统的可恢复性,解码恢复过程中会引入噪声增益,所以中间像的成像质量不能太差,要求系统焦点处的斯特列尔比不低于0.3,优化得到扩展多项式中各参量的取值.优化后的参量 a 为159.98,对应的实际面型的矢高为 $z = \epsilon(x^3 + y^3)$,其中 $\epsilon = a\lambda / (2\pi nR^3)$, n 是相位板的折射率, λ 是入射光波长, R 是归一化半径的大小,经过计算得到矢高表达式,即 $z = 4.74 \times 10^{-5}(x^3 + y^3)$,选定不同的离焦位置来模拟系统的点扩散函数情况,选取离焦量从左到右分别为 -0.24 mm, -0.18 mm, -0.12 mm, -0.06 mm, 0 mm, $+0.06$ mm, $+0.12$ mm, $+0.16$ mm, $+0.24$ mm.图5和图6分别为传统系统和波前编码系统在不同离焦位置处的PSF,通过比较可以看出,波前编码系统的PSF在离焦量在 $-0.24 \sim +0.24$ mm范围内大致保持不变.而传统系统的PSF在不同的离焦位置有不同的形状和大小,传统系统的离焦在 $-0.06 \sim 0$ mm的范围内,成像是可以接受的,因此波前编码系统的焦深拓展约为传统系统的8倍.

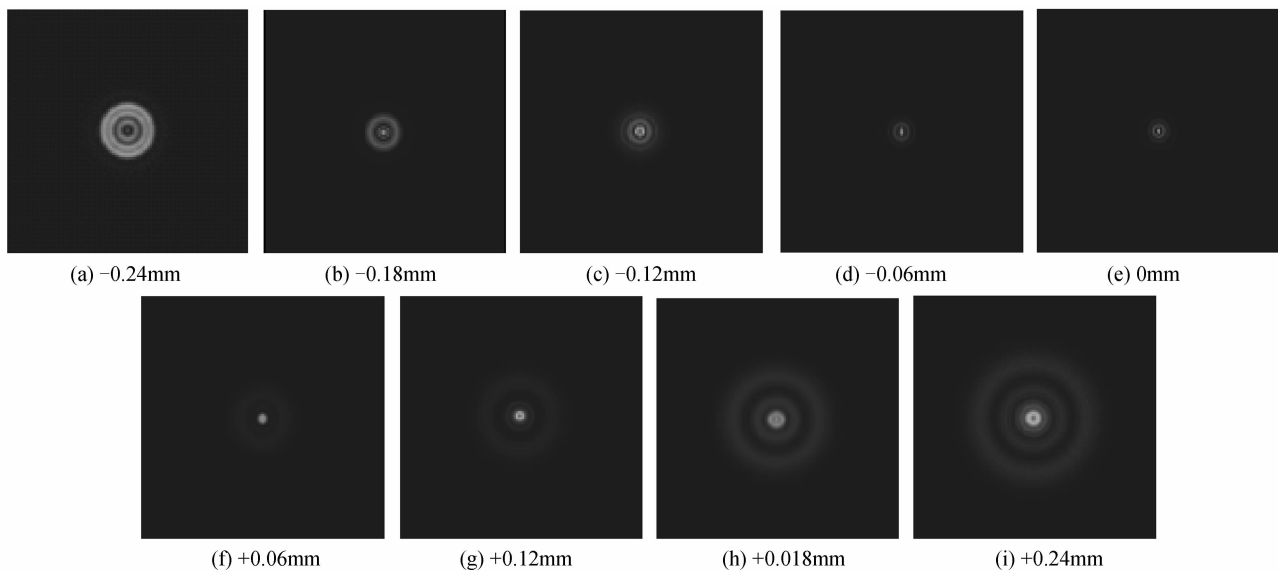
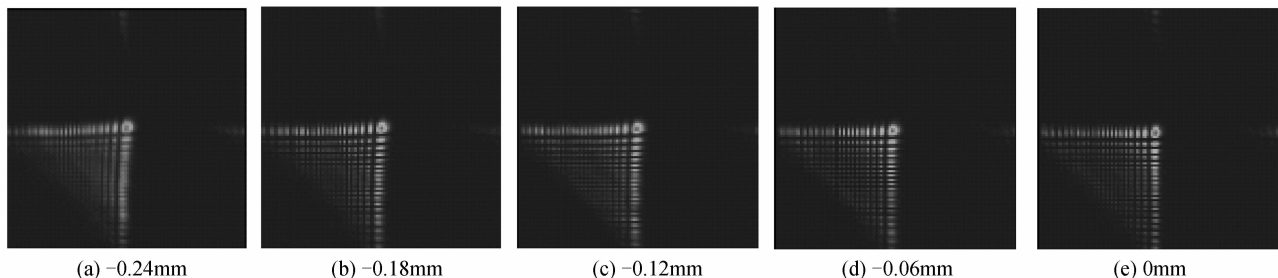


图5 传统系统在不同离焦位置的PSF

Fig. 5 The PSF of the conventional system at different defocus positions



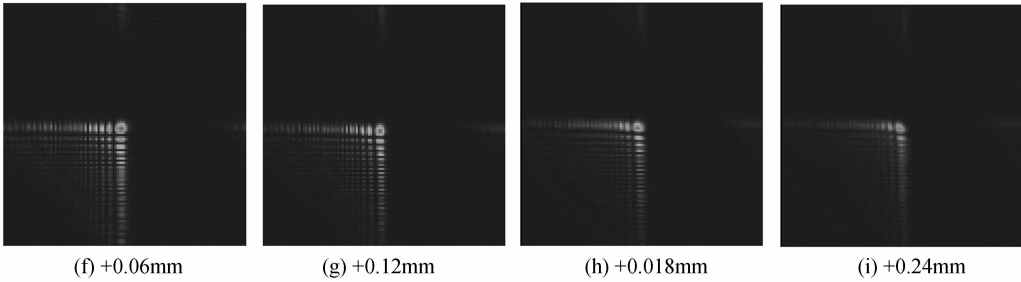


图6 波前编码系统在不同离焦位置的 PSF

Fig. 6 The PSF of the wavefront coding system at different defocus positions

通过设计优化获得了 -0.24 mm、 0 mm、 $+0.24$ mm 三个离焦位置处的 MTF,波前编码系统和传统系统的 MTF 曲线如图 7、图 8,传统系统随着离焦量的增加,MTF 值迅速衰减,空间频率在 20 lp/mm 就

已经衰减到零,高频信息全部损失,而波前编码系统的 MTF 在整个离焦范围内基本保持不变,且曲线在整个通频带内没有零点,即不存在某一空间频率信息损失的情形。

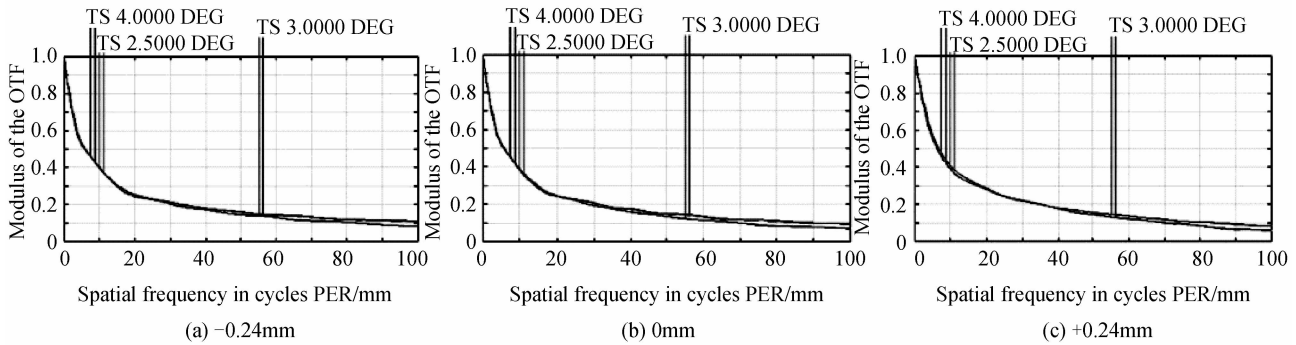


图7 波前编码系统在不同离焦位置的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF of the WFC system at different defocus positions

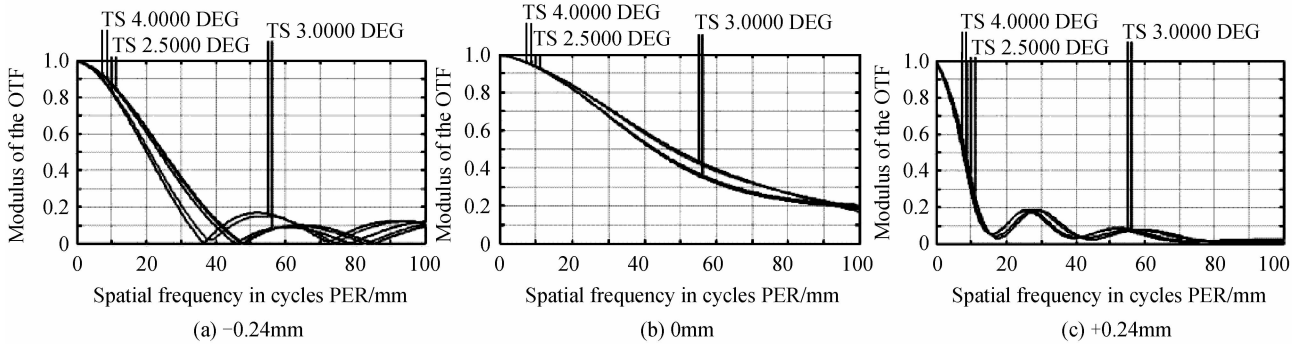


图8 传统系统在不同离焦位置的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF of the conventional system at different defocus positions

为了模拟相位编码板的成像情况,从 CASIA-IrisV1 虹膜数据库中选择一个虹膜图像进行模拟.图 9 为 -0.24 mm、 0 mm、 $+0.24$ mm 三个离焦位置处传统系统所成的虹膜图像以及波前编码系统所成的中间模糊像和复原图像.从图 9(a)可以看出,焦点处的虹膜图像最清晰,其余两个位置的虹膜图像是模糊的.随着离焦的增加模糊程度随之增加,系统的信噪比随离焦增加迅速减小,所以传统系统是不具备离焦不敏感性的.图 9(b)波前编码系统所成的 3 个中间像,尽管焦点

处的像面仍然不能成清晰像,其清晰度明显不如传统系统焦点处所成的像,但是两个离焦位置和正焦处的虹膜图像的模糊程度是一致的.正是由于离焦不敏感性,所以选取正焦处的 PSF 作为统一解码复原的成像滤波器.通过 ZEMAX 软件自带的光瞳数据得到中间模糊像的 PSF,用焦点处的 PSF 作为成像复原的滤波器,采用逆滤波对中间模糊图像进行还原,尽管复原图像存在噪声,但是成像的信噪比非常高,可以应用于后续的虹膜图像识别中。

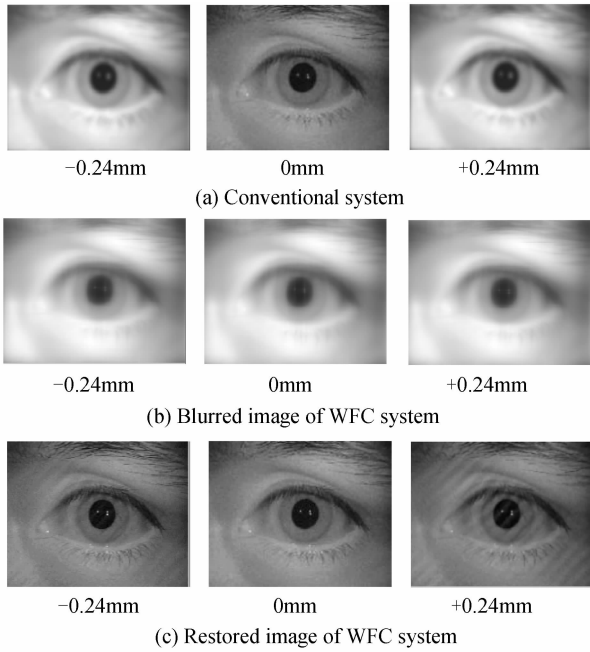


图 9 传统系统和波前编码系统在不同离焦位置的虹膜图像
Fig. 9 The iris images of the conventional system and WFC system at different defocus positions

为了验证波前编码复原像的成像效果,采用峰值信噪比(Peak Signal-to-noise Ratio, PSNR)对复原图像的质量进行客观评价,计算公式为

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{(L-1)^4}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x,y) - \hat{f}(x,y)]^2} \quad (10)$$

式中, $\hat{f}(x,y)$ 和 $f(x,y)$ 分别是复原图像和原始图像在坐标点 (x,y) 处的像素灰度值, L 代表灰度等级, M 和 N 代表由像素点数表征的图像的长和宽。

表 2 为传统系统和 WFC 系统在不同离焦像面处的峰值信噪比,从表中数据可以看出,复原图像的峰值信噪比比传统系统有了很大改善. 复原图像在焦点处

的 PSNR 不如传统系统在正焦状态下的值,这是由于使用逆滤波的图像复原算法,图像中存在噪声的影响,但是在 ± 0.24 mm 离焦状态下的 PSNR 比传统系统高近 4 dB,如果进一步改善复原算法,复原图像的峰值信噪比比传统系统会有更大的改善.

表 2 传统系统和 WFC 系统在不同离焦位置峰值信噪比
Table 2 PSNR of the conventional system and WFC system at different defocus positions

PSNR	-0.24 mm	0 mm	+0.24 mm
Conventional system	14.692 6	24.189 2	14.600 3
WFC system	18.294 2	20.976 6	18.236 5

3.2 带有修正项的立方相位编码板的参量优化及分析

对带有修正项的立方相位编码板也进行了模拟分析,其面型函数为

$$z = a_1(x^3 + y^3) + a_2(x^2y + y^2x) + a_3(x^5 + y^5) + a_4(x^4y + xy^4) + a_5(x^3y^2 + x^2y^3) \quad (11)$$

仍然采用 ZEMAX 软件中的扩展多项式面型来模拟带有修正项的立方相位编码板,采用同样的优化方法,优化后的相位板参量是: $a_1 = 180.3, a_2 = -386.8, a_3 = 97.74, a_4 = -396.5, a_5 = -267.4$,同立方相位编码板,经过计算实际面型失高为

$$z = 2.31 \times 10^{-5}(x^3 + y^3) - 4.96 \times 10^{-5}(x^2y + y^2x) + 1.25 \times 10^{-5}(x^5 + y^5) - 5.08 \times 10^{-5}(x^4y + xy^4) - 3.43 \times 10^{-5}(x^3y^2 + x^2y^3) \quad (12)$$

带有修正项的相位编码板在不同离焦位置的 PSF 如图 10. 从图 10 可以看出,带有修正项的相位编码板在不同离焦位置的 PSF 无论从形状还是大小都发生了明显的变化,其在 $-0.18 \sim +0.12$ mm 的离焦范围内,形状大致保持一致,所以其焦深扩展是传统成像系统焦深的 5 倍,带有修正项的立方相位编码板的 PSF

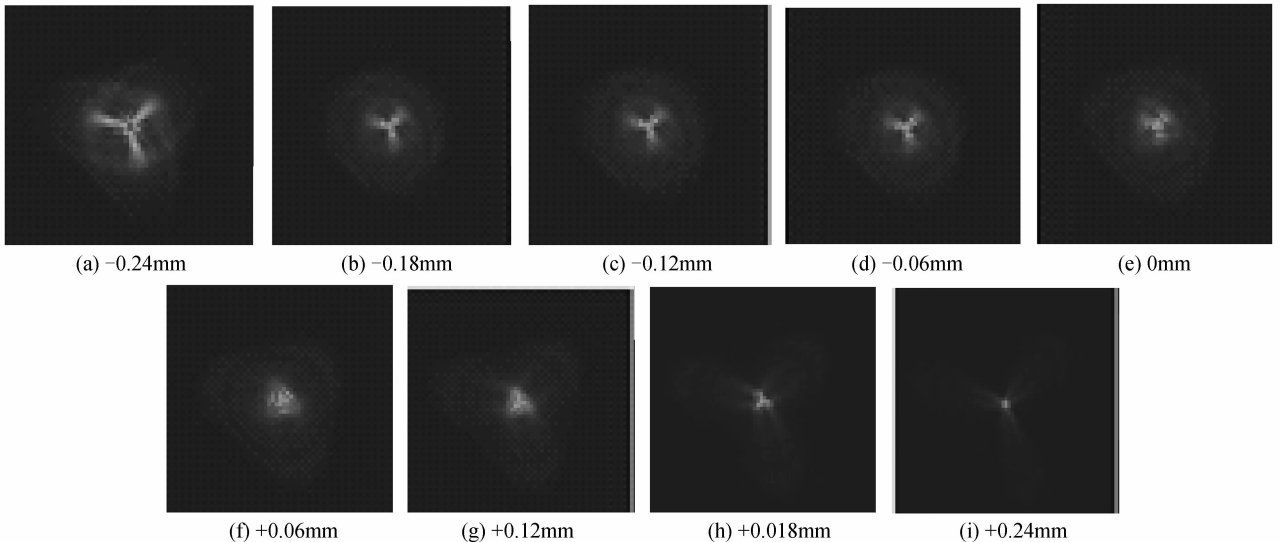


图 10 带有修正项的 WFC 系统在不同离焦位置处的 PSF

Fig. 10 The PSF of modified WFC system at different defocus positions

是对称的形式,其焦深延拓的效果不如立方相位编码板。

4 结论

本文设计了一款在非主动配合的自然状态下成像的虹膜采集成像系统,带有相位编码板的固定焦距的虹膜成像系统可以减少由于小焦深给使用者所带来的诸多不便.使用波前编码成像技术拓展了虹膜采集成像系统的焦深.通过在孔径光阑位置处放置立方相位编码板可以使得MTF离焦不变.比较了立方相位编码板及带修正项的立方相位编码板的焦深延拓效果,并未加相位编码板的光学系统的焦深进行了对比,发现采用立方相位编码板的虹膜采集光学系统的焦深延拓效果最佳,其焦深是传统系统的8倍.由于本设计采用的是模拟虹膜图库,未来的工作是加工出带相位编码板的虹膜相机,并进一步研究虹膜图像还原的算法,使还原图像的信噪比进一步提高,以利于接下来波前编码虹膜识别的研究。

参考文献

- [1] DAUGMAN J G. How iris recognition works [J]. *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, **14**(1): 21-30.
- [2] NARAYANSWAMY R, SILVERIRA P E X, SETTY H, *et al.* Extended depth-of-field iris recognition system for a workstation environment[C]. SPIE, 2005, **5779**: 41-50.
- [3] DAUGMAN J G. High confidence visual recognition of person by a test of statistical independence[J]. *IEEE Transaction on PAMI*, 1993, **15**(1): 1148-1161.
- [4] BARWICK D S. Increasing the information acquisition volume in iris recognition systems[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(26): 4684-4691.
- [5] WANG Xiang-jun, ZHANG Min, DENG Xiao-bei, *et al.* Design of a system for non-contact iris image capture[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(6): 35-38.
王向军,张敏,邓晓蓓,等.非接触式虹膜图像获取系统的设计[J]. *光电工程*, 2005, **32**(6): 35-38.
- [6] LIN Bin, WANG Lin-fen, CAO Xiang-qun. Study of iris image capturing system for iris recognition [J]. *Laser&Infrared*, 2002, **32**(5): 347-349.
林斌,汪林峰,曹向群.虹膜识别中的采集系统研究[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(5): 347-349.
- [7] WANG Lin-feng, LIN Bin. A portable personnel verification system based on iris recognition technology[J]. *Journal of Opto Electronics • Laser*, 2001, **12**(10): 1076-1078.

- 汪林峰,林斌.基于虹膜识别技术的便携式身份认证系统[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(10): 1076-1078.
- [8] YUAN Wei-qi, JI Shuang. Design of iris image acquisition system[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009, **25**(10-2): 21-23.
苑玮琦,金爽.虹膜图像采集装置的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2009, **25**(10-2): 21-23.
- [9] VAN DER GRACHT J, PAUCA V P, SETTY H, *et al.* Iris recognition with enhanced depth-of-field image acquisition[C]. SPIE5438, Visual Information Processing XIII, Orlando, FL, USA, 2004: 120-129.
- [10] NARAYANSWAMY R, JOHNSONG E, SILVEIRA P E X, *et al.* Extending the imaging volume for biometric iris recognition[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(5): 701-712.
- [11] DOWSKI E R, CATHEY W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(10): 1859-1866.
- [12] APOULIS A. Ambiguity function in Fourier optics [J]. *Journal of The Optical Society of America*, 1974, **64**(6): 779-788.
- [13] SHERIF S, CATHEY W T, DOWSKI E R. Phase plate to extend the depth of field of incoherent hybrid imaging systems [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(13): 2709-2721.
- [14] FAN Zhi-gang, CHEN Shou-qian, Chang Hong, *et al.* Non-axial characteristics of strehl ratio of cubic phase mask in wavefront coding system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 1-9.
范志刚,陈守谦,常虹,等.三次相位掩模板波前编码系统非轴向斯特列尔比[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 1-9.
- [15] ZHANG Wen-zi, CHEN Yan-ping, ZHAO Ting-yu, *et al.* Simple OTF stability based method for pupil phase mask's optimization in wavefront coding system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2017-2021
张文字,陈燕萍,赵廷玉,等.一种基于OTF稳定性的波前编码相位板优化方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2017-2021.
- [16] ZHAO T, YE Z, ZHANG W, *et al.* Field depth extension of 2D barcode scanner based on wavefront coding and Projection algorithm[C]. SPIE, 2007, **6837**: 1-11.
- [17] HSIEH S H, YANG H W, HUANG S H, *et al.* Biometric iris image acquisition system with wavefront coding technology[C]. SPIE, 2013, **8907**: 890730.
- [18] PRASAD S, TORGERSEN T C, PAUCA V P, *et al.* Engineering the pupil phase to improve image quality[C]. SPIE, 2003, **5108**: 1-12.
- [19] CASTRO A, OJEDA C J. Increased depth of field with phase-only filters: ambiguity function [C]. SPIE, 2005, **582**: 1-11.