文章编号:1001-5078(2010)09-936-05 ·综述与评论·

波前编码景深延拓研究进展

郝爱花
(西安邮电学院电子工程学院,陕西 西安 710121)

摘 要:波前编码成像技术(WFC)是一种用于景深延拓非常有效的光数混合图像处理技术,本文在简单介绍WFC技术基本原理的基础上,分层次系统介绍了WFC技术的最新设计理论和现实指导意义,举例说明了WFC技术的实际应用价值,最后对波前编码成像技术现状和未来做了简单探讨。

关键词:波前编码;景深延拓;离焦
中图分类号:N39 **文献标识码:**A

Extention depth of field wavefront coded imaging system research progress

HAO Ai-hua
(School of Electronic Engineering,Xi′an University of Post and Telecommunications,Xi′an 710121,China)

Abstract: Wavefront coded imaging technique(WFC) is a very effective optical and digital hybrid image processing technology for the depth of field extension. The basic principles of WFC technology is simply introduced. The latest design theory and reality guide are systematically introduced. The practical application value of WFC technology is illustrated. At last,current and future situation of WFC are discussed.

Key words: wavefront coding;depth of field extention;defocus

1 引 言

波前编码成像技术[1](WFC)是由Colorado大学的Cathey和Dowski与1995年提出的一项用于扩大焦深的光数混合处理技术。它是通过在光学系统的孔径光阑或者是出瞳位置进行波前编码,产生一个中间模糊像,然后通过数字图像处理对这个中间模糊图像进行解码得到最终的清晰图像。其中主要的原因是通过波前编码后的光学系统对离焦量不敏感,产生一个与离焦近似无关的光学传递函数OTF或点扩散函数PSF,且在截止频率范围内调制传递函数MTF没有出现零点,即没有造成信息的丢失。因此可以对不同离焦量的中间模糊像通过同一个光学传递函数进行简单的逆滤波或解卷积进行图像复原。与传统光学系统通过缩小系统相对孔径来扩大焦深的方法相比,这种方法的显著优点是可以在不缩小光瞳的情况下将系统焦深扩大一个数量级,避免了减小相对孔径带来的减小光通量,降低信噪比和减小空间分辨率等缺点。通过这种方法还可以减少光学元件的个数,简化结构,减小尺寸,降低成本,如达到同样的成像效果可以用简单的单透镜加相位掩模板来代替复杂的光学系统。除了可以扩大景深外,波前编码技术还可以抑制各种原因造成的离焦类的误差,如球差、色散、场曲[2-3]以及由温度、振动、装配等原因引起的离焦,减小了它们对物体信息在成像过程中造成的损失。基于波前编码有效的像差抑制能力,可以被应用到许多光学系统中,如数码相机、显微镜[4]、虹膜识别[5]、红外光学系统[6]、合成全息[7]以及微电子技术和机器人学等领域,其应用前景相当广阔。

作者简介:郝爱花(1977-),女,讲师,硕士研究生,主要研究工作是信息光学和光电信息处理。E-mail:haoaihua200177@163.com
收稿日期:2010-03-29

波前编码系统显著的优点使得波前编码成像系统在很多光学系统中都有不可替代的作用。但这种系统的优越性能也是受到某些条件制约的:其一,景深拓展是以损失信噪比为代价的,离焦量越大,系统调制传递函数的值就越小,信噪比就越差;其二,传统技术在仅仅几个微米的空间间隔精确制造一个大像差的非球面相位掩模板是有困难的。因此在设计编码系统时要仔细权衡。

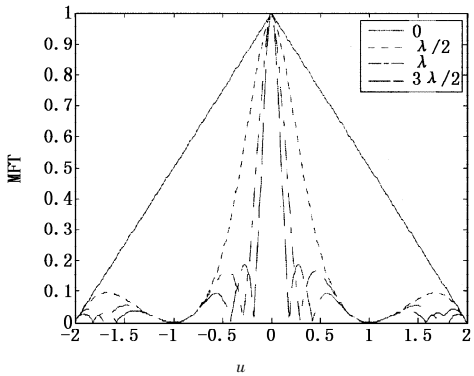
目前国内外在原有基本理论的基础上,对波前编码光学系统的信噪比传递特性和相位编码模型进行了深入的研究,并提出了各种相位表达形式和不同的优化方法,其设计理论逐渐趋于成熟。而对于奇次方非对称非球面镜的加工多采用单点金刚石加工,由于加工的自由度是有限的,即相位掩模板表面的像差不能太大,某种程度上传统加工只能部分满足设计要求。文章的第二部分简单介绍波前编码成像系统的工作原理;第三部分着重介绍波前编码成像系统设计理论的发展和潜在的应用价值;第四部分简单介绍波前编码成像系统的应用;第五部分对文章做一小结,并对波前编码成像系统的发展做了展望。

2　波前编码景深延拓的基本原理

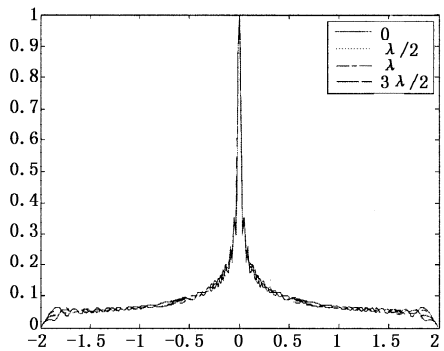
波前编码成像系统是通过在光学系统的光阑位置插入一块奇次非球面的相位掩模板进行波前编码,如果是单透镜也可以直接在单透镜的一个表面设计非球面进行编码,经过编码后的光学系统能够产生一个对离焦类像差不敏感的接收模糊图像,通过后期对模糊图像的数字处理再还原成一幅高质量的清晰图像。下面以 1995 年 Dowski 提出的三次相位掩模板模型为例进行介绍。式(1)为掩模板的相位表达式,x,y 为光瞳平面上的归一化坐标,光瞳为方形光瞳,α 为相位系数,在 α 的取值远远大于 20 的情况下,可以近似认为波前编码成像系统的点扩散函数和光学传递函数与离焦量 W_{20} 无关。

$$P(x,y)=\begin{cases}\exp(\mathrm{i}\alpha(x^3+y^3)), & |x|\leqslant 1,|y|\leqslant 1\\ 0, & \text{others}\end{cases},\alpha\gg 20 \tag{1}$$

图 1 为传统光学系统和波前编码光学系统的调制传递函数曲线图。图 1(a)是认为其他光学像差校正得很好,而仅仅存在离焦像差的传统光学系统传递函数曲线对比图。横坐标 u 为归一化频率,最大值为 2,$u=f_x/f_c$,其中 f_x 为空间频率,f_c 为相干截止频率。图中四条曲线分别对应离焦量取 0,0.5 λ,λ,1.5 λ 的情形。从图中可以看出,随着离焦量的增大,传递特性急剧恶化,在离焦仅为 0.5 λ 时传递曲线就出现了零点,造成了信息不可恢复的丢失;在离焦 λ 和 1.5 λ 的时候,传递曲线变得更加复杂,且零点更多,信息丢失更加严重。图 1(b)是在图 1(a)所述的传统光学中加入三次相位掩模板后的调制传递函数曲线图,其中 $\alpha=20\pi$,离焦量同样取 0,0.5 λ,λ,1.5 λ。图中传递曲线明显下降,但不同离焦量下的曲线基本重合,保持了很好的一致性。更重要的一点是,在整个截止频率范围内,传递曲线没有出现零点,这意味着经过编码后的光学系统在离焦情况下很好地保留了系统截止频率范围内物体的全部信息,仅仅是造成了信噪比的下降,通过合理的图像处理方法,模糊图像可以恢复到高质量的清晰图像。



(a)传统光学系统



(b)波前编码成像系统

图 1　不同离焦量下光学系统的一维调制传递函数曲线图

3　波前编码成像系统的设计

3.1　编码形式

波前编码成像系统最早的相位掩模板模型是 1995 年由 Dowski 提出的三次相位掩模板模型,由模糊函数和稳相法近似导出,在相位系数 α 的取值远远大于 20 的情况下,可以近似认为波前编码成像系统的点扩散函数和光学传递函数与离焦无关,这一结论为波前编码景深延拓技术的发展奠定了很好的研究基础。此后为了进一步使波前编码成像技术符

合实际,且能够最大限度的实现景深延拓,文献[8]给出如果满足景深延拓在焦平面附近轴向对称,即PSF满足 $|h(u,w)|^2=|h(u,-w)|^2$,掩模板的相位分布函数必须满足奇对称,$f(x)=-f(-x)$。文献[9]提出了自由形式相位掩模板FPM的相位分布函数表达式,如式(2),并以整个空间频率范围内二维光学传递函数在不同离焦量下的最小均方误差为评价函数,采用模拟退火算法,取$k=9$,离焦量$\varphi=0,15,30$三个值,以最大限度地扩大景深为目标,优化出了自由形式的相位分布函数表达式。从评价函数和成像仿真结果都可以证明FPM编码系统离焦不敏感性要明显优于传统的CPM编码系统。

$$\varphi(x,y)=\sum_{n=0}^{k}\left(\sum_{m=0}^{n}c_{nm}x^m y^{n-m}\right),n,k\text{ 为奇数} \quad (2)$$

由于多项式中常数项和线性项不会影响成像质量,通常被忽略。如果取多项式中的三次项和五次项,最常见的不分离的奇对称相位分布形式为:

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

由于掩模板相位分布不满足旋转对称,掩模板的加工只能采用单点金刚石加工,基于技术的局限,很多情况相位系数a_i的取值并不能很大,即某种程度上不能完全满足设计要求;此外,加工设备引起的加工误差也会影响景深延拓。

3.2 系统信噪比

波前编码优越的景深延拓性能是以损失信噪比为代价的,基于这一点,文献[10]对光学系统的信噪比做了深入分析,结果发现,对于任何光学系统,无论编码的相位函数,也可以是振幅函数满足什么分布,对于给定的空间频率,在整个离焦范围内,光学系统的信噪比SNR是守恒的。文中根据模糊函数和Parseral定理导出了一维和二维两种空间频率下信噪比在整个离焦范围内的积分表达式,便于理解下面给出一维的结果:

$$\Phi(u)=\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{MTF}^2(u,W_{20})\,\mathrm{d}W_{20}$$
$$\equiv\frac{\lambda}{2u}\cdot 2\left(1-\frac{|u|}{2}\right),|u|\leqslant 2 \quad (4)$$

信噪比SNR和MTF的关系满足式(5):

$$\mathrm{SNR}_n(u,s_i)=\mathrm{SNR}_{c,n}I_{\mathrm{obj}}^2(u)\mathrm{MTF}^2(u,s_i) \quad (5)$$

其中,n为维数;u为归一化频率;$\mathrm{SNR}_{c,n}$为白噪声;$I_{\mathrm{obj}}^2(u)$为归一化物谱。根据式(4),Δs_i景深范围内的平均信噪比为:$\overline{\mathrm{SNR}}(u,\Delta s_i)=\dfrac{\Phi(u)}{\Delta s_i}$,设计者可以根据这一结论确定场深范围,是个具有普遍意义的结论。

具体针对三次相位板模型,文献[11]导出了波前编码成像系统的景深公式,并给出相对与传统光学系统的景深延拓扩展率,根据瑞利判据,普通光学系统能够清晰成像的最大景深$2\Delta=2\lambda d_i^2/L^2$,则波前编码成像系统的景深延拓扩展率$M=6\alpha(1-\lambda d_i|f_x|/L)/\pi$,从式中可以看出景深延拓扩展率$M$和三次相位板系数$\alpha$和空间频率的取值范围有关,当系数$\alpha$和扩展率$M$的大小确定后,能够得到景深延拓的最高空间频率就被确定下来,$|f_x|\leqslant L(1-M\pi/6\alpha)/\lambda d_i$;或者当$f_x$和系数$\alpha$给定,可延拓的景深范围也就确定下来,这一结果对采用三次相位板进行设计的工程人员非常有用。

此外,文献[8]用希尔伯特空间角作为评价函数证明了采用CCD作为光电探测器后,PSF随离焦量的变化要小于采用理想光学探测器的情况,即应用CCD比应用理想探测器光学系统的离焦不敏感性要好。缺点是减小了光学系统的整个横向分辨率,通常情况,如果系统对横向分辨率要求不是太高,如普通数码相机,横向分辨率的减少不会影响成像效果。

3.3 优化设计和图像复原

常见的优化函数有斯托列尔比Strehl ratio、费希尔信息量Fisher information、最大最小优化函数minmax、最小均方误差、希尔伯特空间角等[12]。斯托列尔比则是利用光学系统存在像差时衍射斑的中心亮度和不存在像差时衍射斑的中心亮度之比来表示光学系统的成像质量,当S.D≥0.8时,认为光学系统的成像质量是完善的;费希尔信息量作为评价函数是通过对整个PSF分布和整个离焦范围的积分最小来分析点扩散函数的离焦不敏感性;最大最小优化函数是一个单目标评价函数,求最大目标函数的最小值,通过最大最小优化函数以在整个景深范围内最大限度的恢复中间模糊图像为目标优化相位分布函数,优化算法可以套用Matlab中的子程序fminmax实现,方法比较简单;最小均方误差优化函数则是求最大景深范围内PSF或MTF的最小均方误差;希尔伯特空间角是两个函数之间相似性的度量函数,通过使最大景深范围内的PSF和对焦PSF的希尔伯特空间角最小来优化编码函数,优化算法多采用模拟退火算法和遗传算法等全局优化算法。

由于波前编码成像系统的离焦不敏感性,对应不同离焦量的中间模糊图像可以近似用对焦情况下

的 PSF 和 MTF 进行逆滤波或解卷积进行复原。逆滤波函数通常采用下面的表达式：

$$H_{\text{inverse}} = \frac{\text{OTF}_{\text{diffraction-limited}}}{\text{OTF}_{\text{chirp-encoded}}} \tag{6}$$

对于大视场的情况，PSF 是基于空间变化的，可以采用两种方法进行改进：一方面可以在相位掩模板的优化设计中改进优化函数，在优化函数的构建中加入视场的影响；另一方面可以改进滤波方法，采用一个空间变化的 PSF 代替空间不变的 PSF 进行图像恢复，如采用基于空间变化的 Van Cittert 算法要比基于空间不变的 Lucy-Richardson 算法，图像恢复的效果好[6]。

4 波前编码成像系统的应用

波前编码景深延拓系统的应用非常广阔，可以被应用到许多光学系统中，典型的应用如光学显微镜、虹膜识别、红外光学成像等。

光学显微系统要求高的数值孔径和放大倍数，景深 $2\ \mathrm{d}x = 250\ n\varepsilon/(\Gamma \cdot \mathrm{NA})$，其中 ε 为弥散斑相对于出瞳中心的张角，Γ 为显微镜的放大率，NA 为显微镜的数值孔径。显然景深与数值孔径和放大率成反比，数值孔径和放大倍数越大，景深就越小，因此显微镜的景深通常都很小。对于一个薄的标本，小的景深是可以的。但要观察一个厚物体的细节时，小的景深就不够了，甚至激光共焦扫描显微镜也不能满足要求。因此在显微镜中扩展焦深是非常有必要的。此外，高质量的光学系统对照明、光学、机械以及热稳定性都提出了极高的要求，因此在显微镜中应用波前编码技术还可以避免光源、机械、温度以及装配等原因引起的离焦。

在虹膜识别系统中，对于普通的虹膜识别系统，其最大的缺点就是不能在一个可变的范围内获得一幅正焦的图片，一幅正焦图片必须位于焦深范围内。虹膜是一个有赖于人体和眼睛的运动物体，因此虹膜识别中虹膜图片的获取是关键。前面提到减小光学系统的相对孔径，也会增加场深，但却是以光能量损失为代价的，这样就会导致曝光不足，对比度差，噪声增加，分辨率减小等获得较差的图像质量。获得一幅高质量的图片这些影响是不能被忽略的。如果不减小光瞳，而是通过增加曝光量来扩大焦深，则由于运动模糊会导致图像进一步恶化。但采用波前编码却可以得到较满意的结果[5]。

大部分用于军事的红外光学系统都需要工作于恶劣的环境条件下，其中环境温度的变化是对红外光学仪器的严峻考验，由于红外光学材料的折射率温度系数 $\mathrm{d}n/\mathrm{d}t$ 比较大，如常用的红外光学单晶锗为 $3.96 \times 10^{-4}\,℃^{-1}$，是可见光玻璃的近 200 倍，因此环境温度对红外系统的影响尤为严重。当环境温度变化时，光学元件的曲率、厚度和间隔将发生变化，同时元件材料的折射率也发生变化，从而引起系统焦距变化，像面发生位移。文献[6]报道了采用简单的编码单透镜实现的红外光学成像系统，景深是传统的复杂透镜组合系统的两倍。

5 总 结

本文在简单介绍波前编码成像系统成像原理的基础上，分几部分系统介绍波前编码成像系统最新的设计理论和潜在的设计指导意义，其设计理论逐渐趋于成熟。最后文中还以光学显微镜、虹膜识别系统、红外光学系统为例说明了波前编码成像系统重要的不可替代的实际应用价值，应用前景非常广阔。波前编码成像系统凭借优良的景深延拓性能成为近年来光学研究的一个热点，但这种系统的优越性能也是受到某些条件制约的：其一，景深拓展是以损失信噪比为代价的；其二，应用传统的制造技术在仅仅几微米的空间间隔精确制造一个大像差的非球面相位掩模板是有困难的。因此为了适应市场的需求，波前编码成像技术的发展除了软环境的不断改进，加工工艺或其他新技术的突破也迫在眉睫。

参考文献：

[1] Dow ski E R, Cathey W T. Extended depth of field throughwave front coding[J]. Appl Opt, 1995, 34(10): 1859 - 1866.

[2] Wach H B, Cathey W T, Dowski E R. Control of chromatic focal shift through wavefront coding [J]. Appl Opt, 1998, 37: 5359 - 5367.

[3] W Thomas Cathey, Edward R Dowski. New paradigm for imaging systems [J]. Appl Opt, 2002, 41 (29): 6080 - 6092.

[4] Sara C Tucker, W Thomas Cathey, Edward R Dowski. Extended depth of field and aberration control for inexpensive digital microscope systems [J]. Optics Express, 1999, 4(11): 467 - 474.

[5] Kelly N Smith, V Paul Pauca, Arun Ross, et al. Extended evaluation of simulated wavefront coding technology in Iris recognition[R]//Appeared in the Proc of the First IEEE International Coference on Biometrics, Washington DC, USA, 2007, 9.

[6] Gonzalo Muyo, Amritpal Singh, Mathias Andersson, et al. Infrared imaging with a wavefront-coded singlet lens[J].

Optics Express,2009,17(23):21118 – 21123.

[7] Albertina Castro, Yann Frauel, Bahram Javidi. Integral imaging with large depth of field using anasymmetric phase mask[J]. Optical Society of America, 2007, 15: 10266 – 10273.

[8] Sherif S Sherif, W Thomas Cathey, Ed R Dowski. Phase plate to extend the depth of field of incoherent hybrid imaging systems [J]. Applied Optics, 2004, 43 (13): 2709 – 2721.

[9] Yasuhisa Takahashi, Shinichi Komatsu. Optimized free-form phase mask for extension of depth of field in wave-front-coded imaging[J]. Optics Letters, 2008, 33 (13): 1515 – 1517.

[10] Saeed Bagheri, Paulo E X Silveira, George Barbastathis. Signal-to-noise-ratio limit to the depth-of-field extension for imaging systems with an arbitrary pupil function[J]. Opt. Soc. Am. A, 2009, 26(4): 895 – 908.

[11] 潘超,陈家璧,张荣福. 波前编码成像系统景深扩展率的研究[J]. 光学学报,2008,28(5):870 – 875.

[12] S Prasad, V P Pauca, R J Plemmons. Pupil-phase optimization for extended-focus, aberration-corrected imaging systems[C]. SPIE. Denver, CO(US), 2004, 5559: 335 – 345.