

文章编号: 1001-3806(2008)02-0159-04

## 大景深成像技术及其相移现象的控制

夏春蕾, 郑刚, 戴曙光

(上海理工大学 光电学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了探讨三次方位相板在大景深 CCD 衍射受限成像系统中的作用和分析由三次方位相板引起的成像相移现象, 采用原理对比分析及仿真实验的方法, 得到了轴向离焦参数  $\phi$  和位相板系数  $\alpha$  与成像系统调制传递函数及成像相移量  $s$  的关系函数, 以及物方离焦量  $w$  为波长的 0.5Q、1.5Q、3.0Q 倍时普通成像系统与景深成像系统的辐照度分布图。分析及实验结果表明, 位相板以降低系统光学传递函数对轴向离焦量敏感程度的方式实现大景深成像, 同时必然引起成像相移, 且相移大小与景深放大倍数及位相板系数间存在一定对应关系。而适当控制景深放大倍数并合理选择位相板系数能够有效减小成像相移, 获得满意的成像质量。

**关键词:** 成像系统; 景深; 三次方位相板; 相移

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

### Large depth of field imaging technology & its phase shift control

XIA Chun-lei, ZHENG Gang, DAI Shu-guang

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

**Abstract** The role of cubic phase plate in large depth of field diffraction limited system with CCD detector was discussed and the special phase shift phenomena caused by the cubic phase plate was studied. Mathematical functions indicating the relation between axial defocus parameter  $\phi$ , cubic phase plate shape constant  $\alpha$  and modulation transfer function (MTF) and image shift variables were deduced. Spoke images for standard imaging system and that with large depth of field were shown when defocus variable  $w$  equals to 0.5Q, 1.5Q and 3.0Q times wavelength respectively. Changing optical transfer function and reducing its sensitivity to axial defocus parameter, depth of field for imaging system was enlarged. Along with its enlargement, phase shift appeared simultaneously, which is related with both the extending ratio for depth of field and the constant for cubic phase plate. Thus phase shift could be very small and a satisfactory image might be achieved when the extending ratio was limited to a certain suitable range and a reasonable constant for cubic phase plate was chosen.

**Key words** imaging system; depth of field; cubic phase plate; phase shift

### 引 言

大景深一直以来就是成像系统的研究热点之一。对成像系统而言, 大的景深意味着同一画面中有更多的清晰景物, 意味着更多的可测控、监控对象。增大景深的方法很多, 最直接的是减小相对孔径, 但它同时也会降低像的分辨率。采用环行透镜也是一种可行的方法, 但它对光学系统性能要求较高<sup>[1-2]</sup>。研究较多的还有系列离焦图像合成法<sup>[3]</sup>, 即对同一拍摄对象用不同焦距获得多幅图像, 然后由数字处理技术分析合成一幅大景深图像。此方法的实时应用性较弱。1985年, 美国科罗拉多大学的 CATHEY 和 DOWSKI 提出一种

相位掩模板波前编码方法, 并成功将之应用于显微系统等小场景测试系统中<sup>[4-7]</sup>。他们在光学成像系统中加入一种非球面光学元件, 即三次方位相板 (cubic phase plate, CPP), 从而改变成像系统的光学传递函数使之对离焦量的变化不敏感, 以此获得较大的景深。本文中就将分析三次方位相板在大景深 CCD 衍射受限成像系统中的作用, 讨论大景深成像技术原理, 并展开探讨由三次方位相板产生的图像相移现象, 提出可行的控制方法。

### 1 普通 CCD 衍射受限成像系统

若将物方的光强分布用  $I_o(\xi, \eta)$  来表示, 衍射受限系统的点扩散函数表示为  $|h(u - \xi, v - \eta)|^2$ , 而  $I_i(u, v)$  表示像方的光强分布, 则普通衍射受限系统的像方光强分布可表示为前两者的二维卷积, 这里用  $**$  来表示。即普通衍射受限光学成像系统的成像关

作者简介: 夏春蕾 (1974-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向是光电检测及信息处理。

Email: mayex@163.com

收稿日期: 2007-01-29; 收到修改稿日期: 2007-04-16

系可表示为:

$$I_i(u, v) = I_g(\xi, \eta)^* * |h(u - \xi, v - \eta)|^2 \quad (1)$$

假设用  $a \times b$  的矩形像素 CCD 阵列对系统采样成像, 且假定各像素对成像的效用是均匀的, 则成像  $I_s(u, v)$  可表示为下式:

$$I_s(u, v) = \left[ I_i(u, v)^* * \text{rec}\left[\frac{u}{a}, \frac{v}{b}\right] \right] \text{comb}\left[\frac{u}{u_s}, \frac{v}{v_s}\right] \quad (2)$$

由此, 可定义 CCD 衍射受限成像系统的点扩散函数见 (3) 式。并由它得到系统的光学传递函数 (optical transfer function OTF), 见 (4) 式:

$$[|h(u - \xi, v - \eta)|^2]_{\text{CD}} = |h(u - \xi, v - \eta)|^{2*} * \text{rec}\left[\frac{u}{a}, \frac{v}{b}\right] \quad (3)$$

$$H_{\text{CCD}}(f_x, f_y) = H(f_x, f_y) \text{sinc}(af_x, bf_y) \quad (4)$$

式中,  $f_x, f_y$  是  $x$  与  $y$  方向的空间频率,  $H(f_x, f_y)$  是普通衍射受限光学成像系统的光学传递函数。若  $x$  与  $y$  方向的离焦量分别用  $w_x$  和  $w_y$  来表示, 则  $H(f_x, f_y)$  可表示为:

$$H(f_x, f_y) = \Lambda\left(\frac{f_x}{f_{x0}}\right) \Lambda\left(\frac{f_y}{f_{y0}}\right) \text{sinc}\left[\frac{8v_x}{\lambda}\left(\frac{f_x}{f_{x0}}\right)\left(1 - \frac{|f_x|}{f_{x0}}\right)\right] \times \text{sinc}\left[\frac{8v_y}{\lambda}\left(\frac{f_y}{f_{y0}}\right)\left(1 - \frac{|f_y|}{f_{y0}}\right)\right] \quad (5)$$

式中,  $f_{x0}$  与  $f_{y0}$  分别为  $x$  及  $y$  方向的截止频率。对于一个离焦的 CCD 衍射受限系统, 令离焦参数  $\phi = kw$ , 其中,  $k$  为波数,  $k = 2\pi/\lambda$  则其一维调制传递函数(modulation transfer function MTF)如图 1 所示。图中横坐

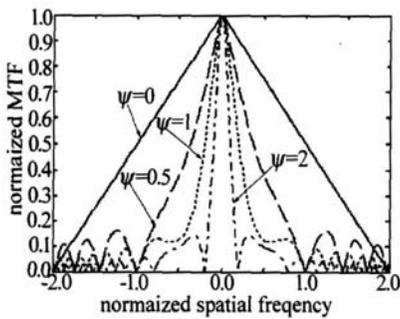


Fig 1 MTF of diffraction limited system with CCD detector

标为归一化的空间频率, 纵坐标为归一化的一维 MTF 值, 离焦参数  $\phi$  的不同取值对应着物方离焦量  $w$  分别取为波长  $\lambda$  的 0 倍, 50 倍, 150 倍及 300 倍。可以看出, 当离焦量  $w$  逐渐变大时, 光学传递函数出现越来越多的零点, 意味着成像中越来越多的信息丢失。这种信息丢失则表明像将产生不可恢复的失真。因此, 普通 CCD 衍射受限系统只能在小范围的离焦情况下形成在人眼看来较为清晰的像。这个物方离焦变动范围就是景深。

## 2 大景深 CCD 衍射受限成像系统

在普通 CCD 衍射受限成像系统的出瞳处加入相位掩模板时, 它就会改变光学传递函数使之对离焦量的变化不再那么敏感。具备这种能力的相位掩模板形式有多种, 如三次方位相板、对数位相板等等<sup>[8-9]</sup>。以 (6) 式描述的三次方位相板为例, 假定该系统采用  $x_{\text{max}} \times y_{\text{max}}$  的矩形光瞳, 则可以推得系统的光瞳函数, 见 (7) 式:

$$P_{\text{mask}}(x, y) = \exp[j\alpha(x^3 + y^3)] \quad (6)$$

$$P(x, y) = \frac{1}{2} \text{rec}\left[\frac{x}{x_{\text{max}}}\right] \text{rec}\left[\frac{y}{y_{\text{max}}}\right] \exp[j\alpha(x^3 + y^3)] \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  是位相板的系数。光学传递函数是光瞳函数的自相关, 结合 (4) 式, 采用稳相法近似积分<sup>[4]</sup>, 能得到加入三次方位相板的 CCD 衍射受限系统的光学传递函数一维形式, 见下式:

$$H(f_x, \phi) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\pi}{12|\alpha f_x|}} \text{sinc}(\alpha f_x) \times \exp\left[j\frac{\alpha f_x^3}{4} - j\frac{\phi^2 f_x}{3\alpha}\right], & (f_x \neq 0) \\ \text{sinc}(\alpha f_x), & (f_x = 0) \end{cases} \quad (8)$$

比较 (5) 式, (8) 式中离焦参数  $\phi$  对光学传递函数的影响被限制在相位部分, 即  $H(f_x, \phi)$  的幅度部分跟  $\phi$  没有关系。虽然这只是近似结果, 但依然可以知道三次方位相板的加入确实能够使得系统光学传递函数的幅度部分即 MTF 对离焦参数  $\phi$  的敏感度大大降低。图 2 所示即为加入三次方位相板后系统的一维 MTF。其

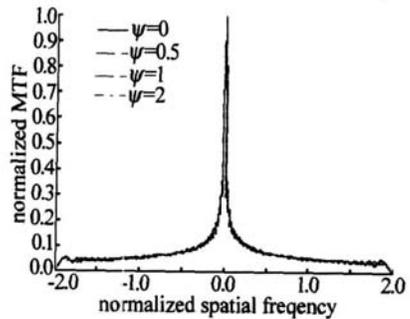


Fig 2 MTF of CCD diffraction limited system with cubic phase plate

纵、横坐标含义同图 1, 图例由上至下的不同  $\phi$  值分别表示取物方离焦量  $w$  为波长的 0 倍, 50 倍, 150 倍及 300 倍。比较图 1, 此时系统的 MTF 与标准 CCD 衍射受限系统的 MTF 有很大不同, 这说明带位相板的系统将会产生一个具有很大失真的像。但同时能够看到, 当离焦参数  $\phi$  由 0 增大至 2 时, 系统的 MTF 图基本保持不变。这说明离焦量  $\phi$  的变化不会对系统成像有太大影响。图 2 还显示在较大的离焦量下, 普通 CCD

衍射受限系统 MTF 中出现的零值在带位相板光学系统的 MTF 中没有出现, 这表明在该系统成像中没有信息丢失。也就说明由三次方位相板所引起的像方失真是可补偿的。综上所述可知, 加入位相板的 CCD 衍射受限系统获得了更大的景深。

### 3 大景深 CCD 衍射受限成像系统中的相移现象

通过 (8) 式能看到, 光学传递函数的相位包含有离焦参数  $\phi$  的信息, 且该部分相位与频率分量  $f_x$  呈线性关系。这说明当  $\phi$  较大时, 它将会引起点扩散函数中心的线性移动, 即在成像中出现相移。为了进一步分析三次方位相板对系统的影响, 作者用轮辐图作为物方做仿真实验来比较普通系统与大景深系统的成像。

图 3 是普通的 CCD 衍射受限系统的轮辐成像。

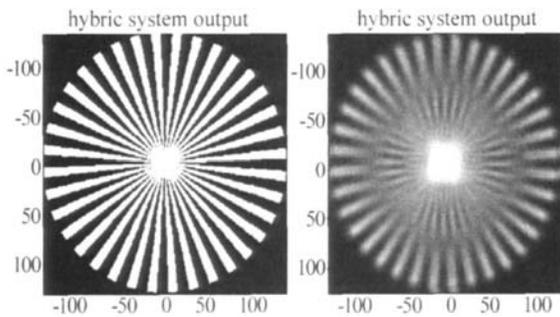


Fig 3 Spoke image of CCD diffraction-limited system

位于左侧的是离焦量  $w = 0$  时的理想像, 右侧是离焦量为 300 个波长时的成像。实验结果显示, 普通 CCD 衍射受限系统的成像会随着离焦量的增大而逐渐模糊化, 最终难以辨认。而且如前面所述, 因为部分信息在通过光学系统时已经丢失, 这种模糊是无法修复的。

图 4 是带有三次方位相板的 CCD 衍射受限系统

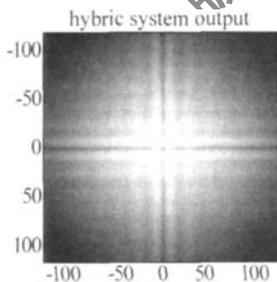


Fig 4 Spoke image of CCD diffraction-limited system with cubic phase plate

的轮辐成像。三次方位相板的加入使成像发生了很大失真, 且成像与  $w = 0$  时的理想像几乎没有什么相似之处。但这种失真是可恢复的。最简单的恢复方法是采用逆变换获得真正想要的成像如图 5 所示。在实际应用系统中, 这种失真与系统噪声引起的失真同时出现, 需要特别考虑滤波器的设计。当系统噪声主要呈加性时, 维纳滤波器就能获得很好的结果<sup>[8,10]</sup>。

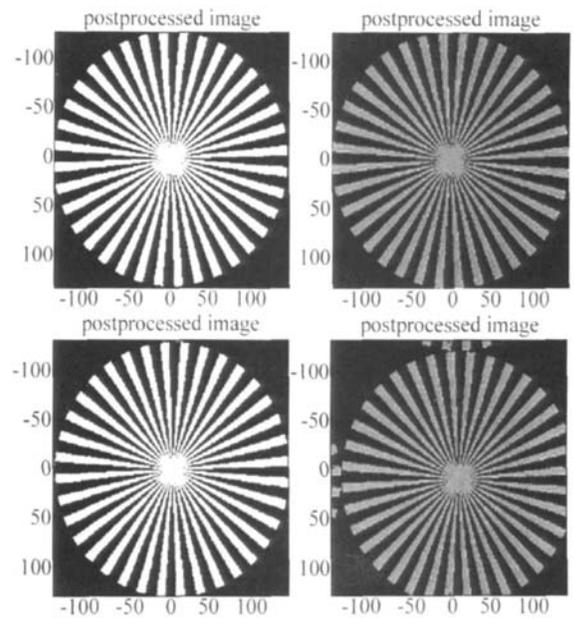


Fig 5 Recovered spoke image using inverse filter

在上面提到, 此时离焦量  $w$  对系统的 MTF 没有显著影响, 因此不同离焦量  $w$  下得到的系统成像将是非常相似的。仿真实验也证明了这一点。只是随着离焦量的增大, 点扩散函数中心移动, 在像中出现了相移。图 5 中按照从上至下从左至右的顺序, 依次给出了物方离焦量  $w$  分别取波长  $\lambda$  的 0 倍, 50 倍, 150 倍及 300 倍时由逆变换恢复出的系统成像。实验结果表明, 随着离焦量的渐渐增大, 图像会出现越来越大的相移。右下角是当  $w$  为 300 倍波长时的成像, 它与左上角离焦量为 0 时理想像相比, 相移现象非常明显。这是由于三次方位相板在使得 MTF 对物方离焦不敏感的同时也改变了传递函数的相位, 造成相位对离焦量敏感性的增大。当离焦量大到一定程度后, 它会使成像位置明显偏移。相移大小与离焦量值之间的关系可用下式表示:

$$s = \mathcal{F} \{ \beta \exp[-j(f_x + f_y) \phi^2 / 3\alpha] \} \quad (9)$$

式中,  $s$  是图像的相移量,  $\alpha$  是三次方位相板的系数,  $\beta$  是跟空间频率  $f_x, f_y$  有关的参数,  $\phi$  是物方离焦参数。离焦参数在表达式中以平方形式  $\phi^2$  出现, 说明相移量的大小对离焦参数的变化最敏感。此外它还受到三次方位相板系数  $\alpha$  限制, 且与空间频率存在类似线性的对应关系。

### 4 大景深 CCD 衍射受限系统的相移控制

(9) 式表明成像的相移大小与  $\phi^2$  成一定关系。如果能够知道  $\phi$  值, 则可以确定相移大小, 从而对图像进行补偿。但一般情况下  $\phi$  值总是一个未知量。因此, 通常总是考虑通过其它系统参数来减弱  $\phi$  值的影响, 从而将相移大小控制在一定范围之内。

对于图 5 的仿真实验结果,即使不修改任何系统参数,当离焦量  $w$  被控制在 150 倍波长范围内时,成像中的相移总是很小。若对成像位置要求不高,此时的相移可以忽略不计。而这种情况下系统景深也已经达到同等条件下普通衍射受限 CCD 成像系统的 10 倍左右。即对景深放大倍数要求的降低意味着相移足够小的较好成像。

此外, (9) 式反映出提高三次方位相板的系数  $\alpha$  也能在一定程度上抑制相移。图 6 中给出了 200 倍波

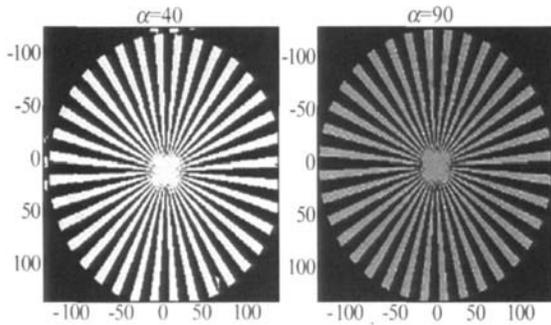


Fig 6 Phase shift with different constant alpha

长离焦情况下,采用不同  $\alpha$  值得到的成像。当  $\alpha = 40$  时,图像中有显著的相移。其它条件不变,将  $\alpha$  提高到 90 此时成像相移则不再明显。因此也可以说较大的  $\alpha$  值能直接降低大景深成像系统对离焦量的敏感度。但大的  $\alpha$  值同时意味着加工的难度增加<sup>[11-12]</sup>,因此实际应用时,应当根据所需景深的大小合理选择  $\alpha$ 。

## 5 结 论

探讨了三次方位相板在大景深 CCD 衍射受限系统中的作用。位相板在增大景深的同时也引起了成像的相移,这种相移现象跟离焦参数  $w$  有密切关系,因此很难完全去除。但在一定的离焦范围内相移基本可

以忽略,即限制景深放大倍数可以控制相移的大小。同时合理选择三次方位相板的系数  $\alpha$  也能有效限制相移的大小。在实际应用中可以考虑需要,合理选择景深大小和  $\alpha$  值就能获得满意的成像效果。

## 参 考 文 献

- [1] WELFORD W T. Use of annular apertures to increase focal depth [ J]. Journal of the Optical society of America, 1960, 50 (8): 749-753.
  - [2] LIU P Sh, LÜ B D. Boundary diffraction wave theory of plane waves diffracted at an annular aperture [ J]. Laser Technology, 2006, 36 (1): 110-112 (in Chinese).
  - [3] WALDKIRCH M V, LUKOW IZ P, TROESTER G M. Multiple imaging technique for extending depth of focus in retinal displays [ J]. Optics Express, 2004, 12 (25): 6350-6365.
  - [4] DOWSKIE R, JR, CATHEY W T. Extended depth of field through wavefront coding [ J]. Appl Opt, 1995, 34 (11): 1859-1866.
  - [5] KUBALA K, DOWSKIE R, CATHEY W T. Reducing complexity in computational imaging systems [ J]. Optics Express, 2003, 11 (18): 2102-2108.
  - [6] SOMAYAJIM, CHRISTENSEN M P. Enhancing form factor and light collection of multiplex imaging system by using a cubic phase mask [ J]. Appl Opt, 2006, 45 (13): 2911-2923.
  - [7] GRACHT J V, EULISS J W. Information-optimized extended depth-of-field imaging system [ J]. Proc SPIE, 2001, 4388: 103-112.
  - [8] CATHEY W T, DOWSKIE R. New paradigm for imaging system [ J]. Appl Opt, 2002, 41 (29): 6080-6092.
  - [9] SHERIF S S, DOWSKIE R, CATHEY W T. Effect of detector noise in incoherent hybrid imaging systems [ J]. Opt Lett, 2005, 30 (10): 566-568.
  - [10] DOWSKIE R, JOHNSON G E. Wavefront coding: a modern method of achieving high performance and/or low cost imaging systems [ J]. Proc SPIE, 1999, 3779: 137-145.
  - [11] HELLMUTH T, BICH A, BÖRRETT R, et al. Variable phase plates for focus invariant optics [ J]. Proc SPIE, 2005, 5962: 15-25.
  - [12] TIAN J Y, GONG M L, YAN P, et al. The design of bi-aspherical single objective lens with numerical aperture of 0.85 [ J]. Laser Technology, 2005, 29 (2): 116-118 (in Chinese).
- 
- (上接第 158 页)
- 射率  $n$  所对应的  $d\delta/di$  值。随着折射率  $n$  的增加,器件对入射角  $i$  的变化更加灵敏。因此,在长方体型相位延迟器的设计中,不但要努力提高器件的消色差精度,而且应降低器件对入射角的灵敏性,这就需要在设计器件时应尽量避免选择高折射率材料。在分析相位延迟的测量误差时,这个应用也是很有价值的。
- ## 参 考 文 献
- [1] LI J Z. Optical handbook [ M ]. Xi'an Science and Technology Press of Shanxi, 1986: 576-580 (in Chinese).
  - [2] CHUN Y. Construction of an optical rotator using quarter-wave plates and optical retarder [ J]. Opt Engng, 1995, 34 (10): 3031-3035.
  - [3] XUE G D, FENG L, JIAN J W, et al. Achromatic wave plates for optical pickup units fabricated by use of in-print lithography [ J]. Opt Lett, 2005, 30 (19): 2614-2616.
  - [4] JEAN-BAPTISTE M, GUILHEM G. Terahertz achromatic quarter-wave plate [ J]. Opt Lett, 2006, 31 (9): 265-267.
  - [5] MCINTYRE C M, HARRIS S E. Achromatic wave plates for visible spectrum [ J]. JOSA, 1968, 58 (12): 1575-1580.
  - [6] NAGIB N N. Theory of oblique incidence phase retarders [ J]. Appl Opt, 1997, 36 (7): 1547-1552.
  - [7] ZHAO P T, LI G H, WU F Q. New design of high precision achromatic phase retarder [ J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25 (7): 980-983 (in Chinese).
  - [8] NAGIB N N. Phase retarders with variable angles of total internal reflection [ J]. Appl Opt, 1994, 33 (7): 1218-1222.
  - [9] NAGIB N N. Phase retarders highly insensitive to the input angle [ J]. Appl Opt, 1998, 37 (7): 1231-1235.
  - [10] LI G L, SONG L K, HAO D Z, et al. Optimal design of half-type achromatic retarder [ J]. Laser Technology, 2005, 30 (5): 539-540 (in Chinese).