

波前编码超分辨成像技术

赵 惠¹, 魏静萱², 庞志海¹, 刘美莹¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学应用研究室, 陕西 西安 710119;

2. 西安电子科技大学 计算机科学与技术学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 波前编码作为一种经典的计算成像技术, 以能够大幅度拓展光学成像系统的焦深而闻名, 并得到了学术界及工业界长期的关注。实际上, 除了焦深的拓展, 波前编码还具备实现超分辨率成像的潜力, 而这在已有的研究中鲜有讨论。一方面, 相位掩模板的引入在降低光学系统传递函数并使其对离焦不敏感的同时, 也有效降低了欠采样数字成像系统中的混叠效应, 从而提供了更适合于进行超分辨率重构的数据源。另一方面, 相位掩模板所引起的点扩散函数支持域的巨大化效应使得以数字的方式、从采样间隔可以被认为是无限小的、理想的光学焦平面点扩散函数来计算与特定探测器物理像元大小相对应的采样点扩散函数成为可能。因此, 从这两个特点出发, 提出了一种为波前编码系统定制的、基于单帧图像放大的超分辨率重构算法, 并且研制了原型样机对超分辨率的效果进行了检验。试验表明: 焦距 50 mm/ F 数 4.5 的 Cooke 三片系统除了焦深拓展超过 20 倍且具有接近衍射受限成像品质之外, 利用复原算法能够实现至少 3 倍的高品质超分辨率重建效果。

关键词: 波前编码; 计算成像; 焦深拓展; 超分辨率

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0422003

Wave-front coded super-resolution imaging technique

Zhao Hui¹, Wei Jingxuan², Pang Zhihai¹, Liu Meiyang¹

(1. Space Optics Lab, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Wave-front coding is a classical computational imaging technique and famous for its capability in extending the depth of focus (DOF) of incoherent imaging system. In fact, besides the DOF extension, this technique has the potentials in realizing super-resolution imaging, which is rare to be investigated in existing literatures. On the one hand, the introduction of phase mask makes defocus invariance of optical transfer function(OTF) possible and the dramatic decrease of modulus of OTF alleviates the aliasing effect owned by most digital imaging systems. In this case, a better image data suitable for super-resolution imaging could be provided. On the other hand, the prominent expansion of point spread function(PSF) allows us to obtain the real sampled PSF corresponding to any specific pitch size in a digital way using the ideal continuous optical PSF whose sampling interval could be considered as unlimitedly small.

收稿日期: 2015-08-20; 修订日期: 2015-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(61107008, 61203372, 61105017)

作者简介: 赵惠(1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事新型光学成像技术方面的研究。Email: zhaohui@opt.ac.cn

Therefore, based on these two characteristics, an amplification based single image super-resolution reconstruction algorithm was especially designed for wave-front coded imaging system and an experimental prototype camera has been fabricated to verify the effectiveness of the algorithm. The results demonstrate that the extended DOF which is more than 20 times original DOF has been obtained and at least 3X super-resolution reconstruction effect could be achieved. Besides that, the quality of reconstructed image approaches the diffraction limited level.

Key words: wave-front coding; computational imaging; depth of focus extension; super-resolution

0 引言

波前编码是一种能够有效拓展光学成像系统景深的计算成像技术。自1995年由美国科罗拉多大学的 Cathey 和 Dowski 提出以来就受到了学术界及工业界的广泛关注^[1]。通过在成像系统的孔径平面上添加一块经过特殊设计的相位掩模板,如经典的三次方型相位板^[1],对数型及改进的对数型相位板^[2-3],指数型相位板^[4],高次方型相位板^[5],多项式型相位板^[6-7]等,系统的点扩散函数就能够对离焦不敏感,即不同离焦量所对应的点扩散函数具有极高的相似度。然而,与衍射受限系统相比,此时的点扩散函数拥有巨大化的支持域,所以波前编码系统所捕获的中间编码图像将呈现均匀一致的模糊,必须通过数字复原滤波^[8-9]予以消除,之后才能够获得目标场景的大焦深清晰图像。

在近20年的研究历程中,国内外围绕波前编码技术所开展的工作主要涉及相位板掩膜函数的设计^[1-7],相位掩模板参数的优化^[10-13],复原滤波算法的构建^[14-16]以及针对特定场合的应用研究^[17-21]等。然而,在已有的研究中,几乎鲜有关于波前编码技术用于超分辨成像的可能性的讨论^[16,23]。目前大多数的数字成像系统都是传感器受限系统,只有当传感器物理像元的尺寸小于 $1\ \mu\text{m}$ 时,系统的分辨率才能接近光学分辨率。尽管减小像元物理尺寸是实现分辨率提升的直接手段,而且近些年来随着CMOS图像传感器工艺的飞速发展,探测器物理像元的尺寸的确越来越小,但受到足够高的信噪比以保证高品质图像获取这一前提条件的限制,实际能够获得的像元尺寸是有限制的。比如,对于 $0.35\ \mu\text{m}$ CMOS工艺来说,一旦像元的有效感光面积不足 $40\ \mu\text{m}^2$,信噪比就

将急剧降低从而严重劣化图像品质^[24-25]。因此,在保持像元尺寸不变的情况下实现分辨率的提升具有现实的研究价值,而波前编码所具有的两个相互关联的特性,使该技术用于超分辨率重构成像成为可能。

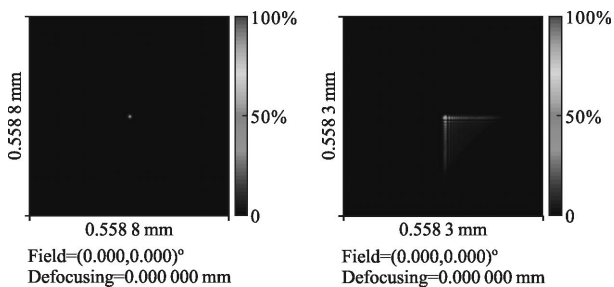
首先,如上所述,经过相位掩膜编码之后,点扩散函数的支持域将显著扩大,与之相对应的就是光学传递函数幅值的降低。因此,在图像传感器像元尺寸大小相同的前提下,波前编码系统由于欠采样导致的混叠效应可以得到抑制,从理论上来说为超分辨率重构提供了更好的数据源。其次,点扩散函数支持域的扩展允许从理想的、来自于光学建模软件的、近似连续分布的光学点扩散函数直接计算得到对应于实际传感器像元大小的离散分布采样点扩散函数,且具有较高的精度。研究表明^[27],利用计算获得的采样点扩散函数对中间编码图像进行滤波同样能够获得高品质的复原效果。不仅如此,随着所希望使用的传感器物理像元的逐渐减小,从理论上计算获得的采样点扩散函数与理想的光学点扩散函数之间将变得越来越相似。这就为在更高的分辨率网格上实现图像的解码和重构提供了技术途径。

因此,针对波前编码技术的特点,提出了一种基于单帧图像放大的超分辨率重构算法。除了详细地描述了算法提出的依据和实现流程之外,还基于经典的Cooke三片形式构建了波前编码大焦深超分辨原理样机,并据此对超分辨重构算法的有效性进行了验证。试验表明:焦距 $50\ \text{mm}/F$ 数4.5的系统扩展倍率超过20倍,能够对最近5 m,最远无穷远的目标均清晰成像。同时能够实现至少3倍的超分辨率重构效果,且重构图像品质接近衍射受限。文中所开展的工作是笔者在多年研究基础之上所进行的又一次拓展,进一步丰富了波前编码计算成像的内涵。

1 基于单帧图像放大的、应用于波前编码系统的超分辨重构算法

传统光学成像系统在像差得到良好校正的前提下,点扩散函数具有非常紧凑的支持域,如图 1(a)所示。相比之下,相位掩模板的引入使系统的点扩散函数的支持域显著地增大,相位调制强度越大,对离焦的抑制效果越好,点扩散函数的支持域就越大,如图 1(b)所示。其中所使用相位掩模板是相位调制强度 α 为 96 的经典三次方型相位板 $\alpha(x^3+y^3)$ 。

图 1 所示的点扩散函数来由光学设计软件 CodeV 产生,是位于光学焦平面上的光学点扩散函数。由于软件中光学焦平面上默认的采样间隔非常小(约 $1.09 \mu\text{m}$),所以该点扩散函数可以被认为是近似连续分布的。当光学焦平面投影到图像探测器上时,光学点扩散函数就被离散化为实际输出的采样点扩散函数。



(a) 传统系统点扩散函数 (b) 波前编码系统点扩散函数
(a) Point spread function of traditional imaging system (b) Point spread function of wave-front coded imaging system

图 1 传统系统与波前编码系统点扩散函数支持域的对比

Fig.1 PSF comparison between traditional and wave-front coded imaging system

采样点扩散函数既可以通过实测获得,也可以利用光学点扩散函数通过网格计算得到^[15]。像差经良好校正的传统光学系统由于其所具有的点扩散函数支持域较小,通过计算得到对应于更小物理像元的采样点扩散函数的意义不大。然而,对于波前编码系统来说,点扩散函数的巨大化使得可以通过计算获取对应于更小物理像元尺寸的采样点扩散函数,且具有很高的精度。所期望的探测器的物理像元越小,计算获得的采样点扩散函数与理想的光学点扩散函数之间的相似度就越高。换句话说,在波前编码系统中,当前探测器对应的采样点扩散函数无法精

确地描述系统的响应,此时在当前像素分辨率网格上对中间模糊图像进行解码时,信息恢复是不充分的。如图 2 所示。当所期望的图像探测器物理像元从 $20 \mu\text{m}$ 逐渐减小到 $2 \mu\text{m}$ 时,计算所获得的采样点扩散函数的确与图 1(b)所示的光学点扩散函数之间的相似度越来越高。

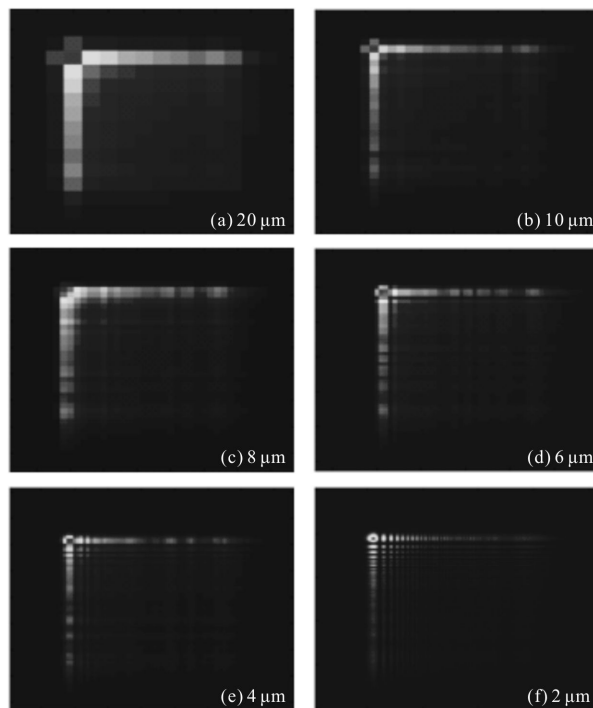
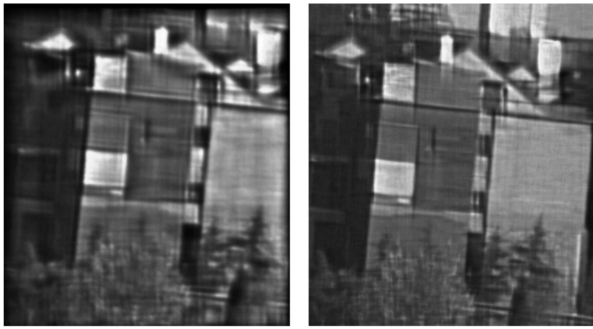


图 2 波前编码系统对应不同物理像元大小的计算采样点扩散函数
Fig.2 Computed sampled PSF corresponding to different pitch size of wave-front coded imaging system

由此可知,波前编码理论允许从理想的光学焦平面点扩散函数出发,通过数值计算的方式来获取能够更精确地描述更高的分辨率网格上的系统的响应,即对应于更小物理像元尺寸的采样点扩散函数,这就为超分辨率重构奠定了基础。在获得了对应于更高分辨率网格的采样点扩散函数之后,实施超分辨率重构的另外一个前提是找到与更高分辨率网格所对应的中间编码图像。在已有的围绕超分辨率重构理论的研究中^[24-28],初始的高分辨率网格图像的估计通常采用插值放大的方式产生,这里也采用类似的方式。假设当前系统所使用的图像探测器的像元大小为 $5.2 \mu\text{m}$,如果要在像元大小为 $2.6 \mu\text{m}$ 的分辨率网格上实施超分辨率重构,那么原始分辨率的中间编码图像就应该被放大 2 倍作为更高分辨率重构图像的初始估计。研究表明,将图像放大到与所期

望物理像元大小对应的像素分辨率尺度是进行超分辨率重建的必要一步。如果用计算获得的与更小物理像元相对应的采样点扩散函数来对当前分辨率中间编码图像进行复原,那么就会在复原图像中产生劣化图像品质的伪信息。图 3 给出了一个典型的测试实例,其中编码解码图像均由文中构建的试验验证系统实际获取。



(a) 点扩散函数与图像对应的像元大小匹配时的复原结果
(b) 点扩散函数与图像对应的像元大小不匹配时的复原结果
(a) Restoration result when pitch sizes corresponding to the PSF and the current image match
(b) Restoration result when pitch sizes corresponding to the PSF and the current image do not match

图 3 采样点扩散函数与编码图像分辨率匹配与否对复原效果的影响

Fig.3 Effect of match or mis-match between PSF and coded image on the final restoration results

因此,针对波前编码系统点扩散函数支持域巨大化这一特点,文中提出了基于单帧图像放大的超分辨率重构算法,由以下几个步骤组成。

步骤 1: 由光学设计软件 CodeV 导出光学焦平面上近似连续分布的光学焦面点扩散函数 $psf_{optical}$;

步骤 2: 确定所期望使用的探测器的物理像元的大小 $p_{smaller}$, 据此计算中间编码图像应该被放大的比率 $r=p_{current}/p_{smaller}$ ($p_{current}$ 代表当前所使用的探测器的物理像元的大小);

步骤 3: 从光学焦面点扩散函数 $psf_{optical}$ 出发,计算得到对应于 $p_{smaller}$ 的采样点扩散函数 $psf_{computed}$ 。

步骤 4: 将中间编码图像放大 r 倍作为与 $p_{smaller}$ 对应的高分辨率网格图像的初始估计。

步骤 5: 利用 $psf_{computed}$ 对插值放大的高分辨率网格估计图像进行复原,从而实现 r 倍的超分辨率重建。

具体来说,由于点扩散函数已知,所以在步骤 5

中使用经典的 Richardson-Lucy 算法^[9]对插值放大后位于高分辨率网格上的中间编码模糊图像进行复原。其中,为了消除振铃效应对复原图像品质的影响,还引入了反镜像边界及 Hanning 窗^[9]对待复原编码图像进行预先处理。

研究表明,较大的点扩散函数支持域要求算法在接近 60 次的迭代后才能取得较好的复原效果。此外,当 Hanning 窗的加窗宽度与点扩散函数 x 或 y 方向的有效像素数目相当时,在反镜向边界处理的协助下,振铃效应才能得到有效抑制。与此同时,由于点扩散函数的巨大化效应,使得点扩散函数的有效支持域对复原结果有很大的影响。这里,提出了一种以像质评价为依据的、基于迭代策略的点扩散函数支持域有效范围的确定方法。首先,给出一个较大的点扩散函数的有效范围,对编码图像进行复原,并评价复原图像的品质;之后,收缩点扩散函数的有效范围,并重复解码和评价这一过程。最后,对应于最高复原图像品质的点扩散函数的有效支持域范围就被应用于复原滤波。

这一重构算法的有效性将由文中所构建的试验验证系统予以检验。图 1~图 2 均以经典的三次方型相位掩模板为例子进行说明。实际上,只要是利用奇对称型相位掩模板实现离焦不变,这一超分辨率重构流程都是适用的。

2 基于 Cooke 三片的波前编码超分辨成像系统的设计及优化

为了对文中所提出的针对波前编码系统的超分辨率重构流程进行检验,这里以经典的 Cooke 三片作为基本形式,通过在孔径平面上添加一块三次方型相位掩模板来实现离焦不敏感。系统设计指标及结构形式如表 1 和图 4 所示。

表 1 波前编码超分辨成像系统参数

表 1 System parameters of wave-front coded super-resolution imaging system

Item	Value
Imaging distance	5m-infinity
$F\#$	4.5
Focal length/mm	50
Working wavelength/nm	480-680
Pitch size/ μm	5.2
Detector limited resolution/ $\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$	96

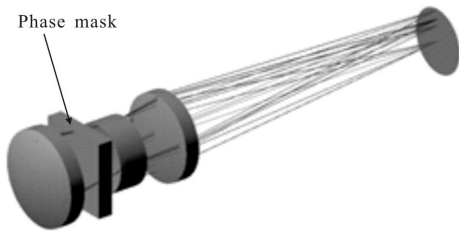


图 4 系统结构形式

Fig.4 System configuration

可以看到,不失一般性,系统焦距选择标准值 50 mm 且 F 数等于 4.5。在不引入波前编码时,要对最近 5 m,最远无穷远的目标进行清晰成像,就意味着,焦面允许的变化量应该达到 0.505 mm。然而,根据几何光学景深计算公式,焦距 50 mm, F 数 4.5 的镜头与像元大小 $5.2 \mu\text{m}$ 的传感器搭配使用时,当对准平面距离镜头 5 m 时,远景深与近景深分别为 245.75 mm 与 223.75 mm。由此可以得到焦深仅为 $48 \mu\text{m}$ 。因此,原始系统无法满足 5 m 到无穷远全部清晰成像的要求,焦深的拓展倍率至少达到 10 倍以上。如图 5 所示,当成像距离从最近 5 m 逐渐增大到无穷远时,原始系统的传函不断降低,同时在一些频段出现零点。这就意味着超出系统焦深的目标场景中的信息会丢失,而且这种信息损失是难以恢复的。

因此,基于波前编码的焦深拓展是必要的。为了便于加工装配和检测,在图 4 所示系统中,除了相位掩模板是非旋转对称非球面之外,其它镜片均是球

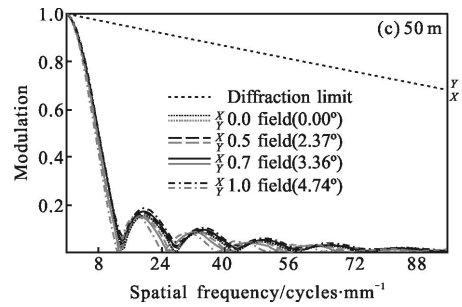
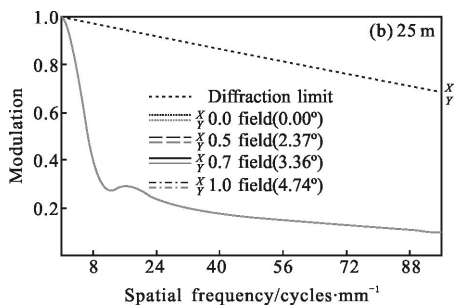
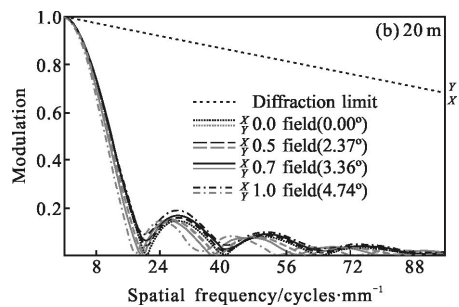
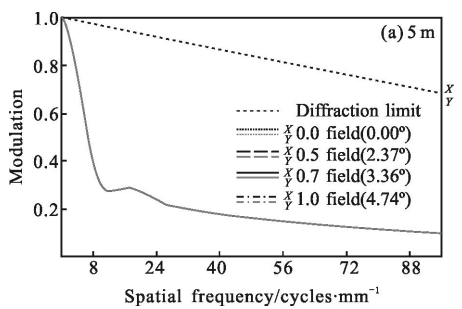
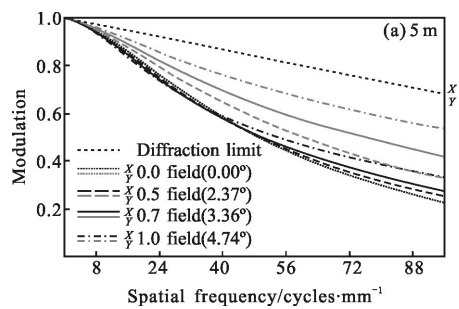


图 5 未引入波前编码时系统传函随离焦而变化的情况

Fig.5 Variation of MTF with respect to defocus without introducing wave-front coding technique

面透镜。其中,三次方型相位板利用 CodeV 所提供的 XY 扩展多项式面形 $S(x,y) = \sum_m \sum_n \alpha_{mn} \cdot X^m Y^n$ 予以描述,其中仅激活 X^3 与 Y^3 项。通过将 X^3 与 Y^3 项对应的系数设置为变量而保持其他镜片参数及间隔保持不变,将用户自定义的目标函数(见本节接下来的讨论)通过 CodeV 提供的宏语言嵌入到优化框架中,从而实现了综合考虑真实系统原始像差平衡的相位板最优参数的获取。优化得到的相位掩模板的参数 α 约等于 0.0123 mm ,此时,与其所对应的不同成像距离下的离焦调制传递函数无论是不同波长还是不同视场均呈现出了良好的一致性,从而证明了离焦不变性,如图 6 所示。



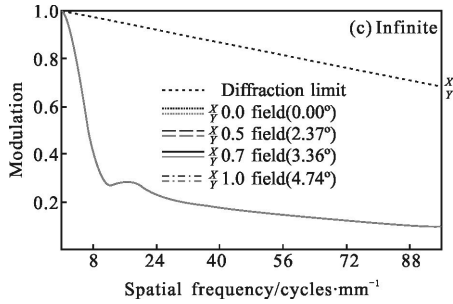


图 6 引入波前编码后的系统传函随离焦而变化的情况

Fig.6 Variation of MTF with respect to defocus with wave-front coding technique introduced

在多数研究中，相位掩模板最优参数的获取都是在理想条件下，即不考虑系统原始像差且脱离光学系统设计软件进行的。由于相位掩模板所带来的效果本身就是一种人为引入的大像差，所以不考虑其与系统原始像差之间的相互平衡是不合适的。因此， α 等于 0.0123 mm 是以 CodeV 作为平台，面向实际系统所获得的优化结果。

目前，很多方法都能够用于获取相位掩模板的最优参数，其中最经典的就是基于 Fisher 信息的优化流程^[11-13]。由于 Fisher 信息能够较好地反应系统性能对特定参数的敏感性，所以与其他许多基于点扩散函数稳定性或者光学传递函数稳定性的优化方法相比，应用更为广泛。然而，对经典 Fisher 信息的优化流程的解析分析揭示了该优化流程一个根源上的缺陷。

$$\min \left(\int_{-\psi}^{\psi} J_{\text{OTF}}(W_{20}, \text{para}) dW_{20} \right) \text{ subject to} \int \text{MTF}(u, W_{20}=0) du \geq Th \quad (1)$$

经典的基于 Fisher 信息的优化流程如公式(1)所示，其中 J 代表由光学传递函数计算得到的 Fisher 信息， ψ 代表离焦参量 W_{20} 的最大取值。 u 是归一化的空间坐标， para 是相位掩模板参数集合， Th 是用于控制优化过程中调制传递函数不过度降低的一个阈值，以利于后期图像复原。

公式(1)中，Fisher 信息可具体表示为公式(2)：

$$J_{\text{OTF}} = \int \left| \frac{\partial(\text{OTF})}{\partial \psi} \right|^2 du \quad (2)$$

将公式(2)中的光学传递函数 OTF 由 $\text{MTF} \cdot e^{i\text{PTF}}$ 替代（其中 MTF 表示调制传递函数，PTF 则代表相位传递函数），那么公式(2)又可以被改写为公式(3)：

$$\begin{aligned} J_{\text{OTF}} &= \int \left| \frac{\partial(\text{OTF})}{\partial \psi} \right|^2 du = \int \left| \frac{\partial(\text{MTF} \cdot e^{i\text{PTF}})}{\partial \psi} \right|^2 du = \\ &= \int \left| i \cdot \text{MTF} \cdot e^{i\text{PTF}} \cdot \frac{\partial(\text{PTF})}{\partial \psi} + e^{i\text{PTF}} \cdot \frac{\partial(\text{MTF})}{\partial \psi} \right|^2 du = \\ &= \int \left| i \cdot \text{MTF} \cdot \frac{\partial(\text{PTF})}{\partial \psi} + \frac{\partial(\text{MTF})}{\partial \psi} \right|^2 du = \\ &= \int \left[\left(\text{MTF} \cdot \frac{\partial(\text{PTF})}{\partial \psi} \right)^2 + \left(\frac{\partial(\text{MTF})}{\partial \psi} \right)^2 \right] du = \\ &= \int \left[\text{MTF}^2 \cdot \left(\frac{\partial(\text{PTF})}{\partial \psi} \right)^2 + 1 \cdot \left(\frac{\partial(\text{MTF})}{\partial \psi} \right)^2 \right] du \quad (3) \end{aligned}$$

$\min(\sqrt{[a \cdot m^2 + b \cdot n^2 + c \cdot l^2]}) \text{ subject to}$

$$\left[\begin{aligned} &\int \text{MTF}(u, W_{20}=0) du \geq Th \\ \text{where, } m &= \int_{-\psi}^{\psi} J_{\text{OTF}}(W_{20}, \text{para}) dW_{20} \\ n &= \int_{-\psi}^{\psi} J_{\text{MTF}}(W_{20}, \text{para}) dW_{20} \\ l &= \int_{-\psi}^{\psi} J_{\text{PTF}}(W_{20}, \text{para}) dW_{20} \\ J_F &= \int \left| \frac{\partial(F)}{\partial \psi} \right|^2 du \\ &F \text{ denotes OTF, MTF or PTF} \\ &a+b+c=1 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

由公式(3)可知，Fisher 信息的计算实际上由调制传递函数对离焦的敏感性 $\frac{\partial(\text{MTF})}{\partial \psi}$ 以及相位传递函数对离焦的敏感性 $\frac{\partial(\text{PTF})}{\partial \psi}$ 两部分构成。然而，这两部分被赋予了不同的权值。显然，调制传递函数的离焦敏感性所对应的权值为 1，而相位调制传递函数的离焦敏感性所对应的权值为 MTF^2 。由于相位掩模板会带来调制传递函数的显著下降，所以在利用公式(1)所对应的优化流程进行优化时，相位传递函数对离焦的敏感性被弱化了。这就导致一个结果，目前大多数相位掩模板在经过基于 Fisher 信息或者类似的方法优化之后，调制传递函数展现出极好的离焦不变特性，而相位传递函数对离焦依然敏感。此时，若使用相同的滤波器对不同离焦的编码图像进行复原，就会因为光学成像系统传函的相位部分与复原滤波函数的相位部分的不匹配而使复原图像的品质降低。因此，这里提出了一种改进的优化流程，

如公式(4)所示。

既然基于 Fisher 信息的理论框架天然地对调制传递函数和相位传递函数对离焦的敏感度分配了不合理的权值,那么最简单的方式就是对两者人为地指定合理的权值。由公式(4)可知,目标函数由三部分按照欧式距离加权而成。首先,从 Fisher 信息的定义出发,利用 OTF,MTF 和 PTF 分别获得三者对离焦的敏感度评价(m, n, l);其次,由于理想情况下 Fisher 信息的值应该接近于 0,所以利用欧式距离计算上述三部分各自偏离理想值的程度,即 $\sqrt{[(m-0)^2+(n-0)^2+(l-0)^2]}$;最后,对三个部分距离理想值的偏差分配不同的权值(a, b, c)(其中相位传递函数的离焦敏感性对应的权值稍大),以此获得既能够使调制传递函数对离焦不敏感,也能够使相位传递函数对离焦不敏感的掩膜参数。

在利用公式(4)对图 4 所示系统进行优化时,三个部分的权值(a, b, c)分别为(0.1, 0.3, 0.6),以此强调相位传递函数的离焦不变性。同时, T_h 被指定为 0.15, 在实现焦深拓展的同时也能够保持较高的复原图像品质。由图 6 可知,改进后的 Fisher 信息相位掩膜板参数优化流程是有效的。

3 波前编码超分辨成像原型系统研制及试验验证

通过优化,在确定了原型系统的各项关键参数之后,投产加工了光机部件,并组装成了波前编码大焦深相机,如图 7 所示,其中 CMOS 相机焦面的规



图 7 加工的光机元件及组装好的 CMOS 大焦深相机

Fig.7 Fabricated opt-mechanical components and assembled CMOS based large DOF camera

格为 $1\ 280 \times 1\ 024$ 像素,像元大小 $5.2\ \mu\text{m}$,对角线宽度 $1/3\ \text{in}(1\ \text{in}=2.54\ \text{cm})$ 。可以看到,相机镜筒上有一

个小的把手,这是用来调节相位掩膜板的方向,使其 x 方向和 y 方向与 CMOS 焦平面的 x 方向和 y 方向一致,否则图像复原时就会引入额外的误差而导致复原品质的下降。这一过程是在平行光管的帮助下实现的,一旦完成标定就始终保持不变。

利用图 7 所示的系统进行成像试验验证时,分两个步骤进行。其一是原始分辨率的大焦深成像效果检验;其二是超分辨率重构效果的检验。

(1) 原始分辨率大焦深成像效果检验

图 8 给出了某场景的中间编码模糊图像以及解码图像。可以看到,解码后的图像非常清晰,而且由于波前编码技术能够对综合波像差畸变不敏感,所以同时消除了与镜头像差对应的模糊,因此图像展示出了更加强烈的高对比度效果。

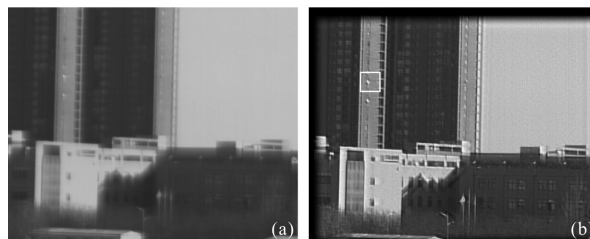


图 8 实测编码图像与解码图像

Fig.8 Really captured coded image and restoration results

在图 7 所示的相机中,镜头与相机之间采用螺距为 $1/32$ 英寸的螺纹连接。镜头相对相机每旋转一周,就相当于产生约 $0.8\ \text{mm}$ 的离焦量。这一设计允许对焦深的拓展量进行实地测量。如图 9(a)所示,当存在 $0.8\ \text{mm}$ 的离焦量时,传统同规格镜头将产生明显的离焦模糊,而编码模糊图像经复原后,其分辨率接近传统镜头对焦状态。当进一步增加离焦量达到 $1\ \text{mm}$ 时,传统同规格镜头的模糊程度更加严重,而编码模糊图像经复原后,场景信息依然清晰可辨,如图 9(b)所示。由此证明,焦深拓展量已经超过了 20 倍。

(2) 超分辨率重构效果检验

这里选取图 8(b)中小方框中的部分来对文中所提出的针对波前编码系统的超分辨率重构流程的有效性进行检验。当前系统探测器的实际物理像元大小为 $5.2\ \mu\text{m}$,首先分别计算出对应于 $2.6\ \mu\text{m}$, $1.733\ \mu\text{m}$ 以及 $1.3\ \mu\text{m}$ 的采样点扩散函数;之后对由图 8 中提取的两个区域进行 2 倍,3 倍以及 4 倍超分辨率重建。效果如图 10 所示。



(a1) 传统同规格镜头离焦 0.8 mm

(a1) Defocus 0.8 mm(conventional lens)



(a2) 波前编码镜头离焦 0.8 mm

(a2) Defocus 0.8 mm(wave-front coding lens)

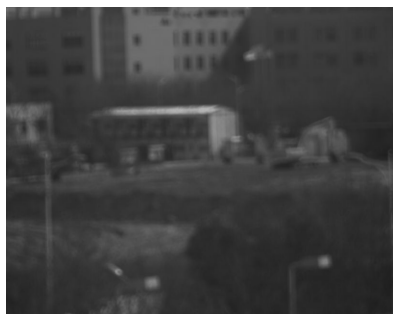


(a3) 波前编码模糊图像复原

(a3) Restored image(wave-front coding lens)

(a) 试验结果 1

(a) Experimental results 1



(b1) 传统同规格镜头离焦 1 mm

(b1) Defocus 1 mm(conventional lens)



(b2) 波前编码镜头离焦 1 mm

(b2) Defocus 1 mm(wave-front coding lens)



(b3) 波前编码模糊图像复原

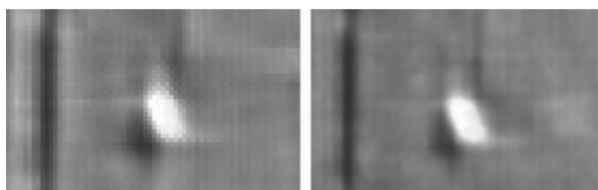
(b3) Restored image(wave-front coding lens)

(b) 试验结果 2

(b) Experimental results 2

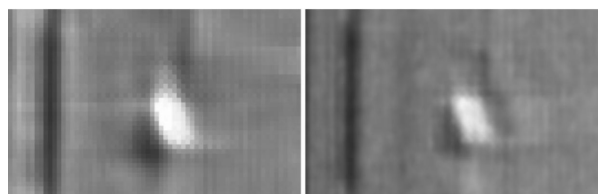
图 9 大焦深试验验证

Fig.9 Experimental demonstration of DOF extension effect



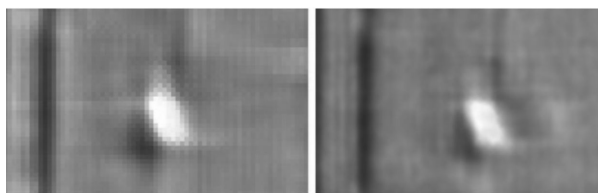
(a) 2x 超分辨率效果

(a) 2x super-resolution improvement



(c) 4x 超分辨率效果

(c) 4x super-resolution improvement



(b) 3x 超分辨率效果

(b) 3x super-resolution improvement

图 10 2x, 3x 及 4x 超分辨率重构效果

Fig.10 2x, 3x and 4x super-resolution reconstruction results

在图 10 中,每一组图像的左边部分代表利用常规插值算法对解码之后的图像(图 8(b)放大之后的效果),而右边则代表利用文中所提出的超分辨重构算法复原后的结果。可以看到,文中所提出的超分辨

重构方法可以在更高的分辨率网格上对场景的细节进行更精确地描述,传统插值放大带来的锯齿效应已经得到了有效地消除,超分辨之后的图像品质良好。显而易见,随着放大倍率的提高,两者之间在品质上的差异越来越显著。由此证明了文中由波前编码系统特性出发所提出的基于单幅图像放大的超分辨率重构流程是有效的。

尽管超分辨重构算法是有效的,但是超分辨的倍数存在物理上的限制。图像的放大倍率越高,所期望的物理像元的尺寸就越小,那么超分辨复原图像中的噪声放大就会变得越显著。以图7所示的系统为例,物理像元实际大小 $5.2\ \mu\text{m}$, $4\times$ 超分辨意味着所期望的实际像元应该等于 $1.3\ \mu\text{m}$,而这已经与光学焦面的理想采样间隔($1.09\ \mu\text{m}$)接近。因此,在利用光学点扩散函数计算采样点扩散函数时,落入所期望的像素大小的高分辨网格中的光子数大大减小,所以才导致复原过程中的信噪比的降低。因此,根据这里的研究,在原始系统像元大小 $5.2\ \mu\text{m}$ 的前提下,当放大倍率不超过4倍时,不但能够实现超分辨率重构,而且重构图像具有较高的视觉品质。

4 结论

波前编码系统调制传递函数的降低使得在探测器物理像元大小不变的前提下混叠效应得到抑制,从而为超分辨重构提供了更加合适的数据源。除此之外,与调制传递函数大幅降相对应的点扩散函数支持域的巨大化使得从光学点扩散函数出发计算对应于更小物理像元的分布于更高分辨率网格上的采样点扩散函数成为可能。基于上述两个特性,文中将超分辨思路引入到波前编码系统中,提出了一种基于单幅图像放大的超分辨重构流程,并利用Cooke三片构建了波前编码大焦深试验验证原型系统对超分辨重构的效果进行了检验。试验表明:不但焦深实现了超过20倍的拓展,而且能够实现至少3倍的分辨率提升,与此同时重构图像具有良好的视觉表现力。目前,由于重构算法采用的是基于迭代策略的RL算法,所以放大倍率比较高时,计算量较大。未来,将对算法进行优化,使其能够嵌入到相机采集电路板上实现准实时的图像捕获与重建。

参考文献:

- [1] Dowski E R, Cathey W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(11): 1859–1866.
- [2] Sherif S S, Cathey W T, Dowski E R. Phase plate to extend the depth of field of incoherent hybrid imaging systems[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(13): 2709–2721.
- [3] Zhao H, Li Q. Improved logarithmic phase mask to extend the depth of field of an incoherent imaging system [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(11): 1171–1173.
- [4] Yang Qingguo, Liu Liren, Sun Jianfeng. Optimized phase pupil masks for extended depth of field [J]. *Opt Commun*, 2007, 272: 56–66.
- [5] Angel Saucedo, Jorge Ojeda-Castaneda. High focal depth with fractional-power wave fronts[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(6): 560–562.
- [6] Caron Nicolas, Sheng Yunlong. Polynomial phase masks for extending the depth of field of a microscope [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(22): E39–E43.
- [7] Hsin-Yueh Sung, Sidney S Yang, Horng Chang. Design of mobile phone lens with extended depth of field based on point-spread function focus invariance[C]//SPIE, 2008, 7061: 706107.
- [8] Andrews H C, Hunt B R. Digital Image Restoration [M]. Beijing: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1997.
- [9] Rafael C Gonzalez, Richard E Wood. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 207–210.
- [10] Prasad S, Torgersen T C. Engineering the pupil phase to improve image quality[C]//SPIE, 2003, 5108: 1–12.
- [11] Prasad S, Torgersen T C, Pauca V P, et al. High-resolution imaging using integrated optical systems [J]. *Wiley Periodicals*, 2004, 14: 67–74.
- [12] Zhang Wenzhi, Chen Yanping, Zhao Tingyu, et al. Simple Strehl ratio based method for pupil phase mask's optimization in wavefront coding system[J]. *Chin Opt Lett*, 2006, 4(9): 515–517.
- [13] Liu Qinxiao, Zhao Tingyu, Chen Yanping, et al. Pupil design based on Fisher information optimization to extend the depth of field in practical optical system [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(2): 159–161.
- [14] Liu Qinxiao. Theory research and application of the decoding algorithms based on wave-front coding imaging system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)

- 刘钦晓. 波前编码系统解码算法理论研究及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [15] Zhao Yingyu. Theory analysis, design and realization of imaging system with deep-field depth and large-viewing angle based on wave-front coding [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
赵廷玉. 大景深大视场波前编码成像系统理论研究、设计及实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [16] Zhang Xin. Research on the image restoration in wave-front coding technology [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
张欣. 波前编码技术中的图像复原研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械研究所, 2010.
- [17] Xu Zhigao. Research on the imaging property of wave-front coding optical system and its application in cell phone lens [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
许志高. 波前编码光学成像系统特性及其在手机摄像头的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [18] Wang Jinyu. Study on the wave-front coding technique and its application in measuring crack width[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
王金玉. 波前编码技术及其在裂缝宽度测量中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [19] Wang Shuai. Design of microscope objective with deep depth of field based on the wave-front coding theory [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
王帅. 基于波前编码技术的大景深显微镜理论及其设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [20] Lv Tianyu. Athermalization of infrared optical system based on wave-front coding [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)
吕天宇. 基于波前编码技术红外光学系统无热化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [21] Eric J Tremblay, Joel Rutkowski, Inga Tamayo, et al. Relaxing the alignment and fabrication tolerances of thin annular folded imaging systems using wavefront coding [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(27): 6751–6758.
- [22] Deokhw Hong, Kangmin Park, Hyungsuck Cho, et al. Flexible depth-of-field imaging system using a spatial light modulator[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(36): 8591–8599.
- [23] S Lee, N Park, Y Park. Breaking diffraction limit of a small f-number compact camera using wavefront coding [J]. *Opt Express*, 2008, 16: 13569–13578.
- [24] Zhang Xiaoling, Shen Lansun. A survey of super resolution imaging reconstruction [J]. *Measurement & Control Technology*, 2005, 24(5): 1–5. (in Chinese)
张晓玲, 沈兰荪. 超分辨率图像复原技术的研究进展[J]. 测控技术, 2005, 24(5): 1–5.
- [25] Zhuo Li, Wang Suyu, Li Xiaoguang. Image/Video Super Resolution [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011: 81–94. (in Chinese)
卓力, 王素玉, 李晓光. 图像视频的超分辨率复原 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 81–94.
- [26] S C Park, M K Park, Moon Gi Kang. Super-resolution image reconstruction: a technical review [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003, (5): 21–36.
- [27] Zhang X L, Lam K M, Shen L S. Image magnification based on adaptive MRF model parameter estimation [C]// Proceedings of International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2005: 653–656.
- [28] S Borman, R Stevenson. Spatial resolution enhancement of low-resolution image sequences: a comprehensive review with directions for future research [R]. Lab of Image and Signal Analysis, University of Notre Dame, 1998.