

文章编号: 0253-2239(2010)02-0388-06

大视场波前编码成像系统中的图像复原

周 峰¹ 叶 然² 李光伟³ 张海涛¹ 王东生¹

(¹ 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084; ² 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

³ 空军装备研究院雷达与电子对抗研究所, 北京 100085

摘要 大视场波前编码成像系统的点扩展函数(PSF)随视场变化敏感,传统上仅使用中心视场的 PSF 会使图像复原非常困难。基于 PSF 在各视场分区近似不变的思想,建立了大视场效应下的图像降质模型,而图像复原正是这一模型的逆过程;从而提出一种基于视场分区的维纳滤波图像复原方法,不同视场区域采用该区域中心的 PSF 进行复原,然后通过插值将各分区的复原图像融合为一体。该复原方法的模型更加精确,而且对不同视场区域可以选择不同的滤波器参数,具有更大的灵活性,测试结果表明该方法可以使复原质量得到明显改善。

关键词 傅里叶光学;波前编码;视场效应;图像复原

中图分类号 O435.2;TN762

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103002.0388

Image Restoration in a Wavefront Coding Imaging System with a Wide Field of View

Zhou Feng¹ Ye Ran² Li Guangwei³ Zhang Haitao¹ Wang Dongsheng¹

¹ Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

³ Institute of Radar and Electronic Countermeasure, Equipment Academy of Air Force, Beijing 100085, China

Abstract The point spread function (PSF) is sensitive to the changes of view field in a wavefront coding system with a wide field of view (FOV), which means that it is difficult to restore the image only using the central PSF as usually do. Image degradation model is established by partitioning the FOV into several blocks where inside each block PSF-invariance is assumed and image restoration is just the inverse of the degradation process. A Wiener filter restoration method based on FOV partition is proposed, which restores each block respectively using its corresponding PSF and combines them together by interpolation. The proposed method is based on a more accurate model and has flexibility in choosing filter parameters for different FOV blocks. Test results verify its superiority to the traditional method.

Key words Fourier optics; wavefront coding; view-field effect; image restoration

1 引 言

波前编码成像系统通过在光学系统中加入相位板对入射光的波前进行编码,使得光学系统的点扩展函数(PSF)对某些像差不敏感,得到中间模糊图像,最后对它解码得到清晰成像,波前编码成像系统常用于抑制离焦和与离焦相关的像差^[1~6]。对中间模糊图像的解码过程实际上是利用系统随离焦近似不变的 PSF 进行反卷积图像复原,目前常用复原方

法是维纳滤波复原^[7~9]和线性方程组迭代复原^[10]。维纳滤波复原方法通常假定在整个视场(FOV)范围内 PSF 具有空间平移不变性,可以仅使用中心视场的 PSF 进行反卷积,模型简单且计算量小,实时性好,因而得到更广泛的应用。而对于大视场的波前编码成像系统,光线倾斜入射相位板所产生的编码效应、视场效应和可能的离焦效应将使边缘视场的 PSF 与中心视场差异较大^[11],仅使用中心视场的

收稿日期: 2009-03-30; 收到修改稿日期: 2009-04-13

作者简介: 周 峰(1982—),男,博士研究生,主要从事光电成像方面的研究。E-mail: zhou-f@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 王东生(1946—),男,教授,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: wangds@mail.tsinghua.edu.cn

PSF 会使图像复原非常困难。针对此问题,文献 [12] 提出通过优化整个光学系统,使相位板前的光线能够较为平缓地入射到相位板,从而减轻视场效应的影响。提出一种基于视场分区的维纳滤波图像复原方法,首先将视场分成若干 PSF 近似不变的区域,分别计算每一视场分区中心的 PSF,然后对每一视场分区使用其中心 PSF 进行维纳滤波反卷积复原,最后通过最近邻点插值或双线性插值将各视场分区的复原图像融合为一体。

2 大视场效应

2.1 光学系统的建模

如图 1 所示,选择典型的三片式照相物镜作为大视场波前编码成像系统的原型,在 Zemax 软件中完成优化设计,然后在最后一个面后 3 mm 处放置一块目前常用的三次方相位板^[1],其右侧面为平面,左侧面引入的相位调制函数为 $\varphi(x, y) = \alpha(x^3 + y^3)$,其中 x, y 为归一化孔径坐标,系数 α 及整个光学系统的主要参数如表 1 所示。

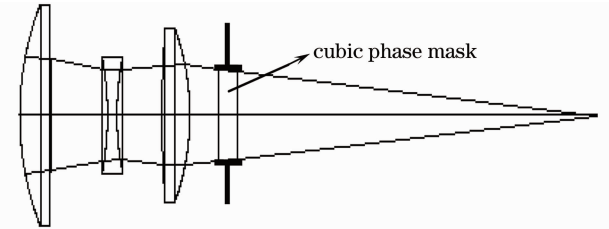


图 1 大视场波前编码成像系统

Fig. 1 Wavefront coding imaging system with a wide field of view

表 1 大视场波前编码成像系统主要参数

Table 1 Main parameters of the wavefront coding imaging system

Main parameters	Value
Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	0.55
Effective focal length f / mm	50
Back focal length f_b / mm	37.954
Aperture D / mm	10
Phase mask radius r / mm	5
Phase mask coefficient $\alpha / \mu\text{m}$	6.25

2.2 大视场效应下的 PSF

使用 Zemax 软件可以计算某一给定视场和像面位置下的 PSF 和光学传递函数(OTF),然后将数

据保存再导入 Matlab 科学计算软件中完成模拟中间模糊成像和滤波器设计。随着视场分区和待考虑像面位置的增多,每次都手动完成这一操作无疑是低效率的,采用 Windows 操作系统的动态数据交换(DDE)技术可以实现 Zemax 和 Matlab 之间的数据通信^[13],从而大大提高工作效率。在作为客户端的 Matlab 中编程呼叫作为服务器的 Zemax,建立数据通信协议,Zemax 根据 Matlab 程序呼叫中设置的视场位置和像面位置计算 PSF 或 OTF,并将数据传递给 Matlab 用于后续显示和计算处理。

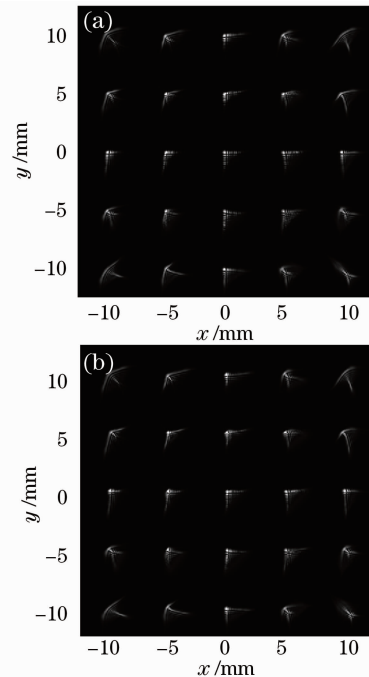


图 2 PSF 的视场效应。(a) $z=37.954 \text{ mm}$,

(b) $z=38.054 \text{ mm}$

Fig. 2 View field effect of the PSF. (a) $z=37.954 \text{ mm}$,

(b) $z=38.054 \text{ mm}$

以图 1 中相位板右侧面所在位置为像面位置计算的起点($z=0$),图 2(a)给出了如上述计算得到理想像面位置处($z=37.954 \text{ mm}$)PSF 随视场变化的分布图,可以注意到随着视场的变大,PSF 与中心视场的 PSF 差异越来越大。图 2(b)给出了离焦 0.1 mm 处($z=38.054 \text{ mm}$)的情况,可以注意到对应视场位置的 PSF 随离焦变化并不敏感。为了量化考察 PSF 随视场位置和像面位置变化的差异,计算了归一化互相关(NCC):

$$C(x', y') = \frac{\sum_{x, y} [f_1(x, y) - \bar{f}_1][f_2(x - x', y - y') - \bar{f}_2]}{\left\{ \sum_{x, y} [f_1(x, y) - \bar{f}_1]^2 \sum_{x, y} [f_2(x - x', y - y') - \bar{f}_2]^2 \right\}^{0.5}} \quad (1)$$

其中 f_1 和 f_2 代表两个函数, \bar{f}_1 和 \bar{f}_2 分别为其均值。以 C 的峰值(C_p) 表征两个 PSF 的相似程度, 在表 2 中按 “ $z=38.054$ mm 处各视场位置的 PSF 与 $z=37.954$ mm 处对应视场 PSF 的 $C_p/z=38.054$ mm

处各视场位置的 PSF 与 $z=37.954$ mm 处中心视场 PSF 的 C_p ” 的格式列出。可见, PSF 随离焦变化不敏感, 而随视场变化较敏感, 仅使用中心视场的 PSF 进行图像复原是不合适的。

表 2 用 C_p 评价 PSF 相似度(视场单位: mm)

Table 1 Evaluation of the PSF similarity using C_p (FOV unit: mm)

	-10	-5	0	5	10
-10	0.936/0.430	0.934/0.539	0.922/0.829	0.945/0.524	0.937/0.430
-5	0.934/0.539	0.912/0.728	0.908/0.761	0.930/0.711	0.953/0.507
0	0.922/0.829	0.908/0.762	0.873/0.873	0.878/0.805	0.914/0.819
5	0.945/0.524	0.930/0.711	0.878/0.805	0.914/0.732	0.9312/0.544
10	0.937/0.419	0.953/0.507	0.914/0.819	0.931/0.544	0.908/0.527

3 滤波器设计

3.1 大视场效应下的图像降质模型

将建立大视场效应下的图像降质模型, 从而由目标物 \mathbf{X} 得到中间模糊图像 \mathbf{Y} 。首先将视场分成 $p \times p$ 个 PSF 近似不变的区域, 则 $n \times n$ 的图像矩阵 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 都可以写成分块矩阵

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} & \cdots & \mathbf{X}_{1p} \\ \mathbf{X}_{21} & \mathbf{X}_{22} & \cdots & \mathbf{X}_{2p} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{X}_{p1} & \mathbf{X}_{p2} & \cdots & \mathbf{X}_{pp} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} & \cdots & \mathbf{Y}_{1p} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} & \cdots & \mathbf{Y}_{2p} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{p1} & \mathbf{Y}_{p2} & \cdots & \mathbf{Y}_{pp} \end{bmatrix}, \end{array} \right. \quad (2)$$

其中 \mathbf{X}_{ij} 和 \mathbf{Y}_{ij} 均为大小 $s \times s$ 的矩阵, 每个区域中心对应的 $F_{PS}(P_{ij})$ 的大小为 $(t+1) \times (t+1)$ 。为得到 \mathbf{Y}_{ij} , 首先从分块矩阵 \mathbf{X} 中取出 \mathbf{Y}_{ij} 对应的相关区域 $\mathbf{X}_{ij}^{(2s+t)}$, 它是相应的 \mathbf{X}_{ij} 向自身周围的均匀扩展, 得到 \mathbf{Y}_{ij} 成像的过程即是 $\mathbf{X}_{ij}^{(2s+t)}$ 与相应视场下的 $F_{PS}(P_{ij})$ 进行二维卷积的过程^[14]:

$$\mathbf{Y}_{ij}^{(2s+2t)} = \mathbf{P}_{ij}^{(t+1)} * \mathbf{X}_{ij}^{(2s+t)}, \quad (3)$$

其中符号 $*$ 表示二维卷积, 各矩阵的大小已经由上标标出。实际上, 将 \mathbf{P}_{ij} 周围进行零填充至 $\mathbf{P}_{ij}^{(2s+t)}$, (3) 式可以用快速傅里叶变换 (FFT) \mathcal{F} 及其逆变换 (IFFT) \mathcal{F}^{-1} 计算:

$$\mathbf{Y}_{ij}^{(2s+t)} = \mathcal{F}^{-1} [\mathcal{F}(\mathbf{P}_{ij}^{(2s+t)}) \circ \mathcal{F}(\mathbf{X}_{ij}^{(2s+t)})], \quad (4)$$

其中符号 \circ 表示对应元素相乘。仅保留 $\mathbf{Y}_{ij}^{(2s+t)}$ 中间的 $2s \times 2s$ 个元素得到 $\mathbf{Y}_{ij}^{(2s)}$, 将其周围进行零填充至 $\mathbf{Y}_{ij}^{(n)}$, 则中间模糊图像

$$\mathbf{Y} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \mathbf{M}_{ij} \circ \mathbf{Y}_{ij}^{(n)} + \mathbf{N}, \quad (5)$$

其中 \mathbf{N} 为大小 $n \times n$ 的加性高斯白噪声矩阵, 其方差

为 σ_N^2 ; \mathbf{M}_{ij} 为大小 $n \times n$ 的插值矩阵, 它决定 \mathbf{P}_{ij} 对 $\mathbf{Y}_{ij}^{(2s)}$ 上每一像素的影响权重, 它只在与 $\mathbf{Y}_{ij}^{(2s)}$ 对应的 $2s \times 2s$ 小区域内可能有非零值, 记此小区域为 $\mathbf{M}_{ij}^{(2s)}$, 并在此区域建立坐标系如图 3 所示, 图中黑色圆点表示各视场分区中心位置。

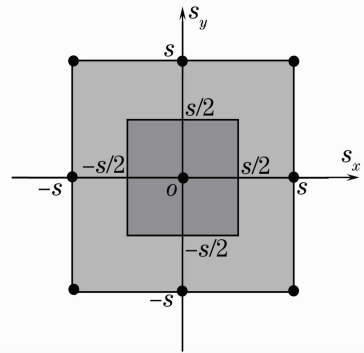


图 3 插值矩阵坐标系

Fig. 3 Coordinate system of the interpolation matrix

如果认为每个区域中心对应的 $F_{PS}(P_{ij})$ 仅作用于该分区 \mathbf{Y}_{ij} , 则属于最近邻点插值, 插值矩阵取作

$$\mathbf{M}_{ij}^{(2s)}(s_x, s_y) = \begin{cases} 1, & |s_x| \leq s/2 \text{ and } |s_y| \leq s/2 \\ 0, & \text{other} \end{cases}. \quad (6)$$

如果认为每个区域中心对应的 PSF \mathbf{P}_{ij} 作用于该分区的扩展 $\mathbf{Y}_{ij}^{(2s)}$, 各像素点受 \mathbf{P}_{ij} 的影响程度随着到区域中心距离的增加而线性递减, 则属于双线性插值, 插值矩阵取作

$$\mathbf{M}_{ij}^{(2s)}(s_x, s_y) = (1 - |s_x|/s)(1 - |s_y|/s), \quad |s_x| \leq s \text{ and } |s_y| \leq s. \quad (7)$$

这时每个中间模糊图像像素点对应的 PSF 实际上由与之最近的四个视场区域中心 PSF 经过双线性插值得到。

3.2 基于视场分区的维纳滤波图像复原方法

经典维纳滤波公式为^[9]

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{1}{\mathbf{H}} \frac{|\mathbf{H}|^2}{|\mathbf{H}|^2 + K} \mathcal{F}(\mathbf{Y}) \right], \quad (8)$$

其中 $\hat{\mathbf{X}}$ 为复原图像, \mathbf{H} 为对焦位置处的 OTF, 它是对焦位置处 PSF 的傅里叶变换, K 为可调参数。而对于大视场波前编码成像系统中的图像复原, (8) 式不能直接应用。对于 \mathbf{Y}_{ij} 对应视场区域, 记对应对焦位置处的 OTF

$$\mathbf{H}_{ij}^{(t+1)} = \mathcal{F}[\mathbf{P}_{ij}^{(t+1)}], \quad (9)$$

令滤波器冲击响应

$$\mathbf{h}_{ij}^{(t+1)} = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{1}{\mathbf{H}_{ij}^{(t+1)}} \frac{|\mathbf{H}_{ij}^{(t+1)}|^2}{|\mathbf{H}_{ij}^{(t+1)}|^2 + \mathbf{K}_{ij}} \right], \quad (10)$$

反卷积图像复原是中间模糊图像成像过程的逆过程。其中 \mathbf{K}_{ij} 表示对应分区的可调参数, 为得到 $\hat{\mathbf{X}}_{ij}$, 首先从分块矩阵 \mathbf{Y} 中取出 $\hat{\mathbf{X}}_{ij}$ 对应的相关区域 $\mathbf{Y}_{ij}^{(2s+t)}$, 它是相应的 \mathbf{Y}_{ij} 向自身周围的均匀扩展, 得到 $\hat{\mathbf{X}}_{ij}$ 的过程即是 $\mathbf{Y}_{ij}^{(2s+t)}$ 与相应视场下的滤波器冲击响应 $\mathbf{h}_{ij}^{(t+1)}$ 进行二维卷积的过程:

$$\hat{\mathbf{X}}_{ij}^{(2s+t)} = \mathbf{h}_{ij}^{(t+1)} * \mathbf{Y}_{ij}^{(2s+t)}, \quad (11)$$

将 $\mathbf{h}_{ij}^{(t+1)}$ 周围进行零填充至 $\mathbf{h}_{ij}^{(2s+t)}$, 则(11)式的计算可表示为

$$\hat{\mathbf{X}}_{ij}^{(2s+t)} = \mathcal{F}^{-1} \left[\mathcal{F}(\mathbf{h}_{ij}^{(2s+t)}) \circ \mathcal{F}(\mathbf{Y}_{ij}^{(2s+t)}) \right] = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{1}{\mathbf{H}_{ij}^{(2s+t)}} \frac{|\mathbf{H}_{ij}^{(2s+t)}|^2}{|\mathbf{H}_{ij}^{(2s+t)}|^2 + \mathbf{K}_{ij}} \circ \mathbf{F}(\mathbf{Y}_{ij}^{(2s+t)}) \right], \quad (12)$$

仅保留 $\hat{\mathbf{X}}_{ij}^{(2s+t)}$ 中间的 $2s \times 2s$ 个元素得到 $\hat{\mathbf{X}}_{ij}^{(2s)}$, 将其周围进行零填充至 $\hat{\mathbf{X}}_{ij}^{(n)}$, 则复原图像

$$\hat{\mathbf{X}} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \mathbf{M}_{ij} \circ \hat{\mathbf{X}}_{ij}, \quad (13)$$

其中插值矩阵 \mathbf{M}_{ij} 的可由(6)或(7)式决定。

4 测试结果

图 4(a) 是进行算法测试的九宫格式模拟目标物。考虑视场范围 $-10 \sim 10$ mm, 把目标物分成 $17 \times 17 = 289$ 个 PSF 近似不变的视场区域, 按照上述大视场效应下的图像降质模型得到无噪声条件下的中间模糊图像, 图 4(b) 所示为像面位置 $z = 37.954$ mm 处的情形, 可以看到整个视场中图像的分辨率都很低, 其它像面位置处的情形与之类似。这里和下文图像复原过程中插值矩阵均使用双线性插值模式, 原因在于使用最近邻点插值时每个视场区域中心对应的 PSF 仅作用于该分区, 这造成模拟降质或复原后的图像在各分区边界处不够连续, 图 4(c) 所示为使用 9×9 分区、最近邻点插值得到的复原图像, 图 4(d) 为其局部放大, 可以看到明显的不连续现象。

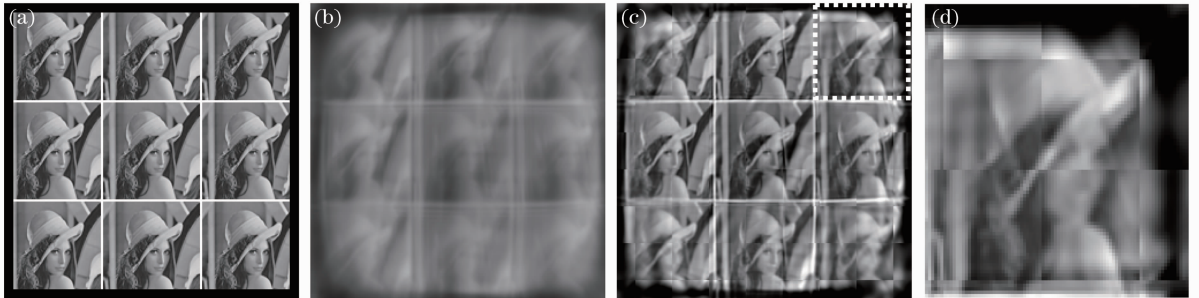


图 4 (a) 模拟目标物; (b) 模糊图像; (c) 最近邻点插值对应的复原图像; (d) 图(c)中右上角虚线方框部分的放大
Fig. 4 (a) Simulated target object; (b) blurred intermediate image; (c) restored image corresponding to the nearest interpolation; (d) enlargement of the blocked part with dashed line in (c)

图 5 给出了无噪声条件下的图像复原结果, 分别采用 1×1 (即传统上只使用中心视场 PSF 的复原方法), 3×3 , 5×5 , 9×9 分区, 按照上述基于视场分区的维纳滤波图像复原方法, 并在各复原图像下给出了其与模拟目标物图像的 C_p 值, 用以度量二者间的相似度。可调参数 K 通常根据复原结果采取试探法选择, 因模拟目标物为已知, 采用搜索算法^[15], 均取 C_p 值最大时的参数 K 。又由于采用了分区复原方案, 各分区可有不同的 \mathbf{K}_{ij} , 分别取其最优值, 这为复原带来了很大灵活性。比较图 5 中各

复原图像可以知道, 基于视场分区的维纳滤波图像复原方法比传统方法优越, 随着分区数目的增加, 各像面位置处的复原结果都得到改善, C_p 的变化趋势与上述结论是一致的, 但可预见这种改善将随着分区数目的增加逐渐变得微弱, 而同时计算量和存储量将迅速增加, 实际中应该在复原质量和复原速度之间找到平衡点。视场边缘处的图像恢复是很困难的, 这是由于其调制传递函数(MTF)下降很大, 目标物的高频成分截止, 在中间模糊图像形成过程中未能通过相位板“编码”进入系统。

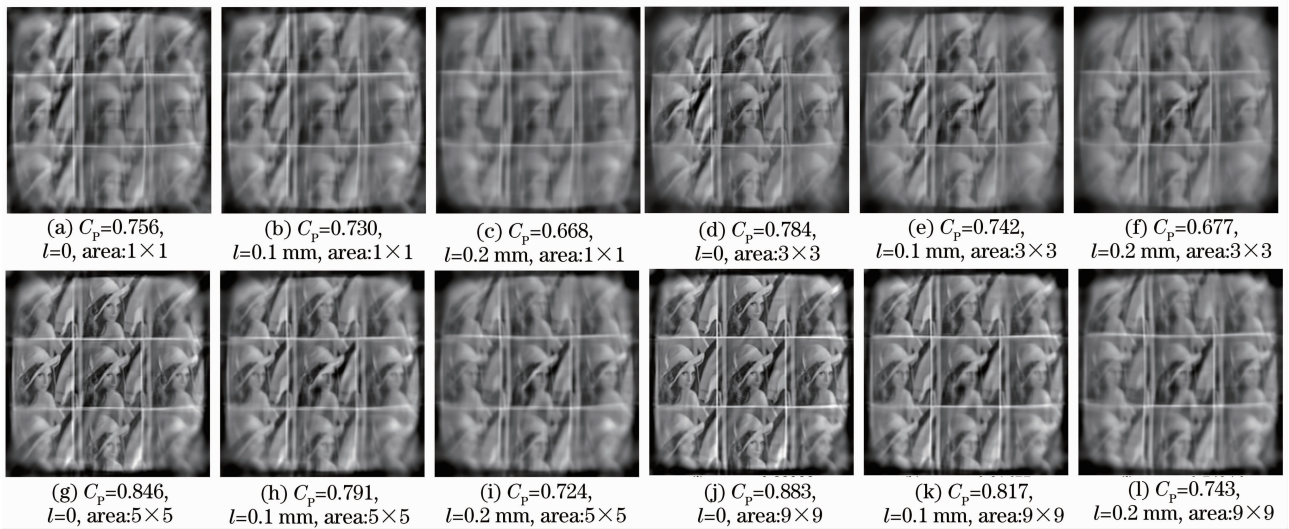


图 5 无噪声下的复原图像。

Fig. 5 Restored images under noise-free condition

定义信噪比(SNR) $R_{SN} = 10\lg(\sigma_s^2/\sigma_n^2)$, 其中 σ_s^2 为中间模糊图像(即信号)的方差, l 为离焦量。对中间模糊图像添加不同方差的加性高斯白噪声, 图 6 考察了不同 SNR 下 1×1 和 9×9 分区时的图像复原情况, 3×3 和 5×5 时的情形介乎二者之间。随着 SNR 的下降, 复原结果逐渐恶化; 其中 1×1 分区

时的复原结果受噪声影响相对较小, 但 9×9 分区时的复原结果仍明显占优; 另一方面, 离焦越大复原结果受噪声影响也相对较小, 这是由于在 1×1 分区时和大离焦时用于复原的 PSF 本身误差较大, 成为影响复原质量的主要因素, 而噪声的影响反倒表现得不甚明显。

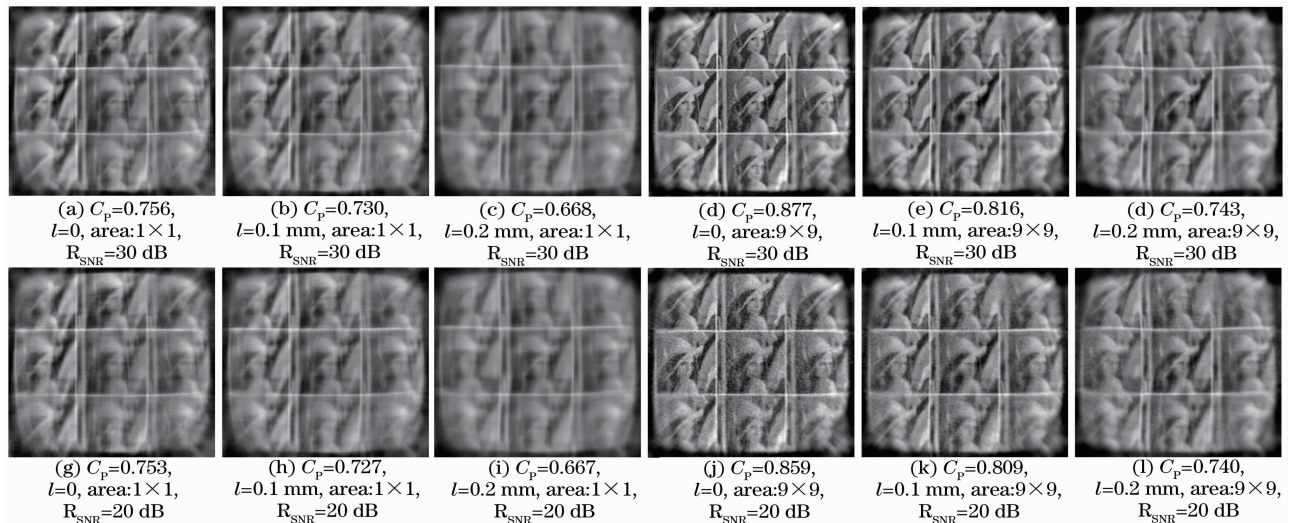


图 6 有噪声下复原图像

Fig. 6 Restored images under noise condition

5 结 论

从分析大视场波前编码成像系统 PSF 随视场和离焦变化入手, 提出一种基于视场分区的维纳滤波图像复原方法, 其核心思想在于不同视场区域采用该区域中心的 PSF 进行复原, 然后通过各种插值方法将各分区的复原图像融合为一体。基于 PSF 在各视场分区近似不变的思想, 本文建立了大视场

效应下的图像降质模型, 而图像复原正是这一模型的逆过程。相对于传统上只使用中心视场 PSF 的复原方法, 基于视场分区的维纳滤波图像复原方法的模型更加精确, 而且对不同视场区域可以选择不同的滤波器参数, 具有更大的灵活性, 可以使复原质量得到明显改善。在各视场分区复原图像的融合过程中, 双线性插值性能优越, 能保持各分区边界处连

续过渡,而且计算量增加并不多;采用更复杂的插值模式将可能进一步改善复原图像的质量。

参 考 文 献

- 1 E. R. Dowski, W. T. Cathey. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(11): 1859~1866
- 2 S. Mezouari, A. R. Harvey. Wavefront coding for aberration compensation in thermal imaging systems [C]. *SPIE*, 2001, **4442**: 34~42
- 3 Chen Yanping, Zhang Wenzhi, Zhao Tingyu *et al.*. Imaging characteristics of wave front coding system within spatial domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1425~1429
陈燕平,张文字,赵廷玉等.波前编码系统成像特性的空间域分析[J].*光学学报*, 2007, **27**(8): 1425~1429
- 4 Yang Qingguo, Liu Liren, Sun Jianfeng *et al.*. Property of wavefront coding imaging systems for extending the depth of field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1807~1812
阳庆国,刘立人,孙建峰等.扩大景深的波前编码成像系统特性分析[J].*光学学报*, 2006, **26**(12): 1807~1812
- 5 Pan Chao, Chen Jiabi, Zhang Rongfu *et al.*. Extension ratio of the depth of field for wavefront coding imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 870~875
潘超,陈家璧,张荣福等.波前编码成像系统景深延拓扩展率的研究[J].*光学学报*, 2008, **28**(5): 870~875
- 6 Zhao Tingyu, Zhang Wenzhi, Ye Zi *et al.*. Design of wave front coding system based on evaluation function of Fisher information [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1096~1101
赵廷玉,张文字,叶子等.应用费希尔信息量评价函数的波前编码系统设计[J].*光学学报*, 2007, **27**(6): 1096~1101
- 7 Q. Yang, L. Liu, J. Sun. Optimized phase pupil masks for extended depth of field[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **272**: 56~66
- 8 Feng Zhou, Guangwei Li, Haitao Zhang *et al.*. Rational phase mask to extend the depth of field in optical-digital hybrid imaging systems[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 380~382
- 9 Feng Yan, Ligong Zheng, Xuejun Zhang. Image restoration of an off-axis three-mirror anastigmatic optical system with wavefront coding technology[J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(1): 017006-1~8
- 10 Qinxiao Liu, Tingyu Zhao, Wenzhi Zhang *et al.*. Image restoration based on generalized minimal residual methods with antireflective boundary conditions in a wavefront coding system [J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(12): 127005-1~5
- 11 Chen Yanping, Zhang Wenzhi, Zhao Tingyu *et al.*. Spot diagram analysis for wavefront coding imaging systems with an odd-symmetrical phase plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1622~1627
陈燕平,张文字,赵廷玉等.奇对称型相位板波前编码成像系统的点列图分析[J].*光学学报*, 2007, **27**(9): 1622~1627
- 12 Huang Weiwei, Ye Zi, Zhao Tingyu *et al.*. Elimination of field effect of wavefront coding system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 983~986
黄薇薇,叶子,赵廷玉等.波前编码系统相位板视场效应的消除[J].*光子学报*, 2008, **37**(5): 983~986
- 13 ZEMAX Development Corporation. ZEMAX Optical Design Program User's Guide [M]. USA: ZEMAX Development Corporation, 2007, 669~703
- 14 J. G. Nagy, D. P. O'Leary. Fast iterative image restoration with a spatially-varying psf[C]. *SPIE*, 1997, **3162**: 388~399
- 15 D. R. Jones, C. D. Perttunen, B. E. Stuckman. Lipschitzian optimization without the lipschitz constant[J]. *J. Optimization Theory and Application*, 1993, **79**: 157~181