

文章编号: 0253-2239(2009)03-0648-06

# 一种空间变化 PSF 图像分块复原的拼接方法

陶小平 冯华君 雷 华 李 奇 徐之海

(浙江大学现代光学仪器重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 介绍了一种退化函数随空间变化图像的分块复原和拼接方法, 首先以等晕区为依据对退化函数随空间变化的图像进行分块并向外延伸一定区域, 然后使用 Lucy-Richard 算法对每一个图像块进行图像复原, 在去除各复原图像块包含明显振铃波纹的部分边缘区域之后, 将相邻图像块剩余的重叠区像素以其到等晕区边界的距离构成的加权系数进行叠加, 拼接得到完整的图像。该方法能够消除退化函数随空间变化的图像分块复原处理时产生的振铃波纹, 在诸如卫星遥感、飞机航拍图像复原, 医学图像处理等众多领域均可广泛应用。

**关键词** 图像处理; 空间变化 PSF; 图像分块复原; 等晕区; 渐变拼接

中图分类号 TN911 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0648

## A Splicing Method of Sectioned Restoration Algorithm for Images with Space-Variant Point Spread Function

Tao Xiaoping Feng Huajun Lei Hua Li Qi Xu Zhihai

(State Key Laboratory of Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A sectioned restoration algorithm for images with space-variant point spread function and the according splicing method are introduced. Firstly, the blurred image is divided to sub-frame sections based on isoplanatic region and extended outward region. Then, the sub-sections are restored by Lucy-Richard algorithm. After removing the boundary regions which contain obvious ringing artifacts, the pixels in the rest of overlapping region between adjacent sections are weight stacked. The weight coefficients are related to the distances between the pixels and the boundary. At last, the sub-frames are spliced together to construct the composite full-image. The method is effective for eliminating the ringing artifacts coupled with sectioned image restoration with space-variant degraded function. It can be used in image restoration of remote-sensing with satellite and aircraft, and also medical image processing.

**Key words** image processing; space-variant point spread function; sectioned method for image restoration; isoplanatic region; gradual splicing

### 1 引 言

由于受光学设计, 加工, 装校, 电荷耦合器件 (CCD) 采样, 工作环境的不稳定以及噪声等因素影响, 数字成像系统获得的图像与实际物体相比总有一定的模糊。为了尽可能多的得到原物体的细节信息, 图像复原技术自上世纪五十年代开始发展后, 限制滤波, 最小二乘维纳滤波, 功率谱滤波, 最大熵复原算法, 空间自适应限制复原算法, 盲目反卷积算法等方法陆续被提出来<sup>[1, 2]</sup>。但这些算法都

基于一个假设, 即整幅图像各点的退化函数是一样的。然而事实上成像系统的各视场的退化是不同的, 如光学透镜造成的场曲、畸变是以光轴为中心呈径向分布; 若图像包含运动物体, 则其退化是与其运动方向有关; 而成像平台的不规则振动, 工作环境气流的变化等, 造成各视场的退化可能毫无规律可言。对于点扩展函数 (PSF) 随空间发生变化的图像, 若仍采用上述算法, 使用同一个的退化函数来处理显然是不够准确的, 针对此类图像的复原研

收稿日期: 2008-06-19; 收到修改稿日期: 2008-08-29

基金项目: 国家 863 计划 (2006AA12Z107) 资助。

作者简介: 陶小平 (1984—), 女, 博士生, 主要从事图像复原, 图像评价等方面的研究。E-mail: TaoXP99@gmail.com

导师简介: 冯华君 (1963—), 男, 硕士, 教授, 博导, 主要从事成像系统, 遥感等方面的研究。E-mail: fenghj@zju.edu.cn

究也一直在深入当中。

Alexander<sup>[3~5]</sup>先后发表三篇文章论述了利用空间坐标变换法重建空间变化 PSF 图像, 该方法的思路是找到一个坐标空间, 图像转换到该空间后其各点退化是空间不变的, 在这个空间使用一般算法进行复原之后, 再转换回原图像空间。该方法的前提是退化函数的空间变化规律必须以解析方式表达; 其另一缺点是在坐标变换的过程中, 正变换是非均匀采样, 反变换是插值, 这两次运算均引入了附加的模糊和噪声; 此外, 坐标变换改变了噪声分布, 可能会使得平稳噪声变得非平稳。Jain 和 Angel 首先提出用共轭梯度法解决空间变化 PSF 图像恢复问题<sup>[6]</sup>, 只是该方法计算量较大。而 John<sup>[7~9]</sup>提出的卡尔曼滤波法也存在计算量过大难以处理大幅图标的问题。Trussell 和 Hunt 提出基于图像分块的复原算法<sup>[10, 11]</sup>, 之后 James<sup>[12]</sup>, Thomas<sup>[13]</sup>和 Leah<sup>[14]</sup>等都进一步发展了该方法。由于空间变化 PSF 图像复原问题的巨大存储量和计算量, Mohammad 使用了多台计算机并行运算的方式从硬件上来克服这一困难<sup>[15]</sup>。James<sup>[16]</sup>和 Tod<sup>[17]</sup>等人将空间变化的 PSF 用正交分解的方式进行表达, 寻找到一组简单而准确的正交基对于减小图像复原计算量的问题是很有吸引力的。之后 Mats<sup>[18]</sup>等使用多幅图像的信息来复原图像也取得了良好的效果。

空间变化 PSF 图像复原的问题在国内的研究则相对较少。上海理工大学的徐伯庆等<sup>[19]</sup>在使用仪器测量出一幅图像 180 个 PSF 后, 使用相应的 180 个逆滤波器完成图像复原。重庆大学李平所在的研究小组对 PSF 正交分解法进行了研究和讨论<sup>[20~22]</sup>。

本文着重讨论图像分块的复原方法。由于分块图像在复原之后其边界附近往往伴有振铃波纹, 影响了拼接后的图像质量, 所以在进行图像分块时, 自等晕区边界往外延伸一定区域, 尽可能使振铃波纹分布在重叠区域, 在拼接之前可以将振铃部分切除; 另外, 由于振铃波纹区域并不易判断, 波纹不一定能完全去除, 而且相邻图像块边界两边在复原之后灰度可能不连续, 于是依据重叠区像素到边界的距离构造加权系数, 使用重叠区数据完成渐变的拼接, 以去除拼接图像视觉上的割裂感。

## 2 图像分块复原

对于理想的线性成像系统来说, 其成像过程可

以用源图像与 PSF 的卷积来表示, 即

$$I(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u, v) P(x-u, y-v) dx dy, \quad (1)$$

式中  $S$  为源图像,  $P$  为系统的退化函数,  $I$  为输出图像,  $u, v$  为物面坐标,  $x, y$  为像面坐标。

而各视场 PSF 不同的成像系统, 其 PSF 不仅是像面坐标的函数, 也与物面坐标有关。其成像过程需以下式来表达:

$$I(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u, v) P(u, v, x-u, y-v) du dv, \quad (2)$$

式中各参数含义同(1)式, 可以看到(2)式中的  $P$  多两个变量。在实际的成像系统中, PSF 的变化应是连续的, 而 CCD 获取的图像是数字化的, 我们在图像处理中用到的 PSF 也是量化的。如果认为它在一定区域内是近似不变的, 即等晕区, 我们可以在等晕区内使用反卷积的方式进行图像复原, 然后将各分块图像拼接起来, 这就是图像分块复原方法的基本思路。

在物面上将图像分割为  $N$  块, 那么相应的 PSF 可以表示为

$$P(u, v, x-u, y-v) = \sum_1^N P_N(x, y).$$

图像的分块可以是矩形, 圆形或者任意其它形状, 本文的仿真使用了矩形分块和圆形-环形分块作为示例。图 1 是源图像以及两幅空间变化 PSF 的仿真图像, 分别使用了  $3 \times 3$  矩形分块和圆形-环形分块, 其中图 1(b) 中块 5, 块 2、4、6、8 和块 1、3、7、9 分别使用了不同的退化函数  $PSF_{b1}$ ,  $PSF_{b2}$  和  $PSF_{b3}$ , 模糊程度依次递增; 图 1(c) 由内向外分三层, 各层退化函数不同  $PSF_{c1}$ ,  $PSF_{c2}$  和  $PSF_{c3}$ , 模糊程度依次递增。

图 2 是使用单一 PSF ( $PSF_{b2}$  和  $PSF_{c2}$ ) 复原得到的图像, 可以看出图像中部由于使用不正确的退化函数而出现伪信息, 而图像外层仍然较模糊, 没有得到很好的复原。

图 3 是两幅图像使用等晕区分块, 每个图像块是使用 Lucy-Richard 算法进行反卷积之后拼接得到的复原图像。我们可以看到图像各部分清晰度与图 2 相比均有提高, 然而其缺陷也是明显的, 分块的边界附近伴有振铃波纹, 严重影响了图像质量。



图 1 (a) 原图像; (b) 矩形分块模糊图像; (c) 圆形分块模糊图像

Fig. 1 (a) Original Image; (b) rectangle-sectioned blurred image; (c) circle-sectioned blurred image

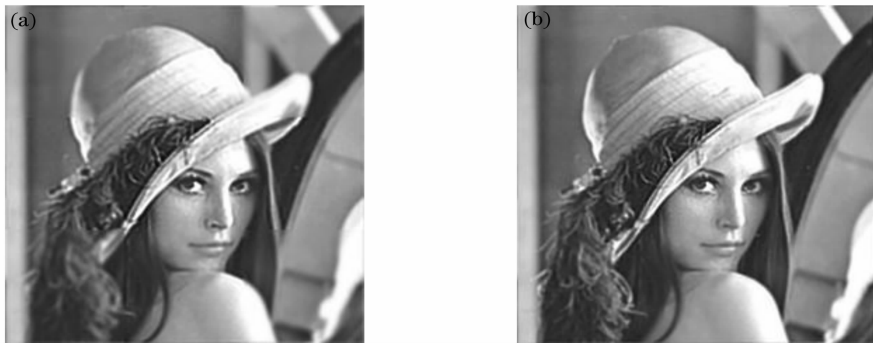


图 2 (a) 矩形分块模糊图像  $PSF_{b_2}$  复原结果; (b) 圆形分块模糊图像  $PSF_{c_2}$  复原结果

Fig. 2 (a) Restoration of the rectangle-sectioned blurred image with  $PSF_{b_2}$ ; (b) restoration of the circle-sectioned blurred image with  $PSF_{c_2}$

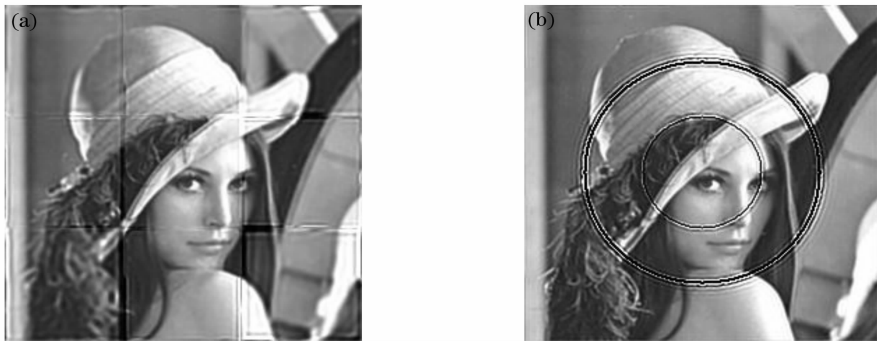


图 3 (a) 矩形分块模糊图像分块复原结果; (b) 圆形分块模糊图像分块复原结果

Fig. 3 (a) Restoration of the rectangle-sectioned blurred image with sectioned method; (b) restoration of the circle-sectioned blurred image with sectioned method

### 3 分块图像边缘渐变拼接

为了消除图像分块边界附近的振铃波纹, 将分块边界自等晕区边界外延, 使相邻图像块有一定区域的重叠, 图像块复原之后的振铃波纹分布在该重叠区域中。然而无论是程序判读还是人工判读, 要完全准确的寻找振铃分布区域是很困难的, 所以在预估的基础上适当加大该区域。当然出于运算量的考虑, 该区域也不宜太大。使用图 4 所示的方法来

分割图像。

图 4(a) 中 [1][2][3] 分别表示对应  $PSF_{b_1}$ ,  $PSF_{b_2}$  和  $PSF_{b_3}$  模糊的区域, [4] 表示相邻两个图像块重叠的区域, [5] 表示相邻四个图像块重叠的区域; 图 4(b) 中 [1][2][3] 分别表示对应  $PSF_{c_1}$ ,  $PSF_{c_2}$  和  $PSF_{c_3}$  模糊的区域, 与矩形分块不同的是, 圆形-环形分块没有四邻域的重叠区域, 只有相邻两个图像块重叠的区域, 如图 4(b) 中 [4] 所示。

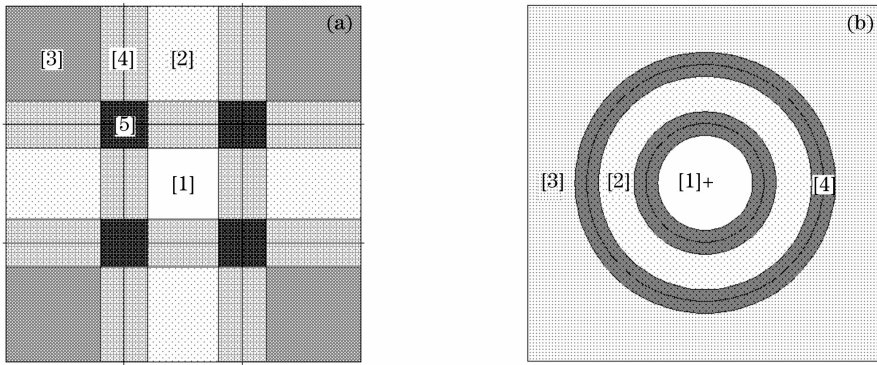


图 4 (a) 矩形分块；(b) 圆形分块

Fig. 4 (a) Rectangle section; (b) circle section

每一个图像块在经过图像复原之后，去除其明显被振铃所破坏的边缘部分，相邻图像块仍保留的重叠区域像素以其到等晕区边界的距离构成的加权系数叠加计算以完成渐变拼接。这样即使重叠区域仍有剩余的振铃波纹，也能被加权叠加的过程削弱或者去除，这一过程同时也能改善边界灰度的不连续。

以一维方向上的重叠为例来简化说明该加权系数，设相邻两图像块分别以  $X, Y$  表示，两者拼接后图像以  $Z$  表示，如图 5 所示。 $X, Y$  的大小分别是  $M, N$ ，图像边界自等晕区边界往外延伸  $L$ ，即等晕区边界在  $X$  的第  $M-L$  列，在  $Y$  的第  $L$  列。 $X, Y$  在经过图像复原处理之后，去除了包含振铃波纹的  $l$  列，那么剩下的两图像块的重叠区宽度  $2d = 2(L-l)$ ，即此时的等晕区边界在  $X$  的第  $M-d$  列，在  $Y$  的第  $d$  列。两侧图像重叠区各过渡元素的权重系数按  $50\%/d = 1/(2d)$  递推：

$$\begin{aligned}
 Z_{M-d+1} &= X_{M-d+1} \times (1 - \frac{1}{2d}) + Y_1 \times \frac{1}{2d}, \\
 Z_{M-d+2} &= X_{M-d+2} \times (1 - \frac{1}{2d} \times 2) + Y_2 \times \frac{1}{2d} \times 2, \\
 Z_{M-d+3} &= X_{M-d+3} \times (1 - \frac{1}{2d} \times 3) + Y_3 \times \frac{1}{2d} \times 3, \\
 &\dots \\
 Z_{M-1} &= X_{M-1} \times [1 - \frac{1}{2d} \times (d-1)] + Y_{d-1} \times \frac{1}{2d} \times (d-1), \\
 Z_M &= X_M \times \frac{1}{2} + Y_d \times \frac{1}{2}, \\
 Z_{M+1} &= X_{M+1} \times \frac{1}{2} + Y_{d+1} \times \frac{1}{2}, \\
 Z_{M+2} &= X_{M+2} \times [1 - \frac{1}{2d} \times (d+1)] + Y_{d+2} \times \frac{1}{2d} \times (d+1), \\
 &\dots \\
 Z_{M+d-1} &= X_{M+d-1} \times [1 - \frac{1}{2d} (2d-2)] + Y_{2d-1} \times \frac{1}{2d} (2d-2), \\
 Z_{M+d} &= X_{M+d} \times [1 - \frac{1}{2d} (2d-1)] + Y_{2d} \times \frac{1}{2d} (2d-1).
 \end{aligned}$$

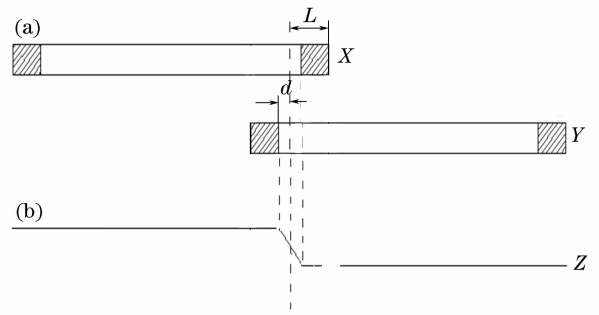


图 5 (a) 图像分块边缘重叠区一维示意图，阴影部分表示振铃波纹区域；(b) 图像分块复原后去除振铃波纹部分，余下重叠区域边缘灰度渐变示意图

Fig. 5 (a) One-dimensional schematic diagram of the overlapped region of image sections and the shaded parts are the regions which contain ringing artifacts; (b) the gradual intensity schematic diagram of the rest overlapped region after eliminating the ringing artifacts

### 4 仿真图像和分析

我们将 lena 图像以  $15 * 15$  的 PSF 进行模糊，图像分割的重叠区域像素数为 15，分割后的各图像块以 Lucy-Richard 算法进行复原，然后去除各图像块重叠区的 10 个像素，剩下部分进行渐变拼接，结果如图 6 所示。与图 3 相比，可以看到图 6 拼接后的图像的振铃波纹得到很好的抑制，边界的过渡也十分平滑，图像复原质量很好。表 1 列出了渐变拼接的结果与图 1~图 3 的模糊图像和复原图像的质量评价的对比，除了熵(entropy)函数，其它四种评价方法 MSE (Mean square error)、PSNR (Peak signal to noise ratio)、SSIM (Structural similarity)、MSSIM (Mean structural similarity) 皆表明图 6 的复原结果要优于其它几幅图像。

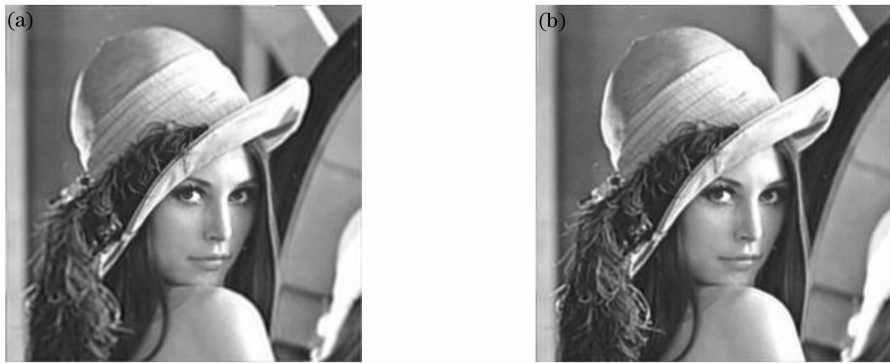


图 6 (a) 矩形分块模糊图像渐变拼接结果; (b) 圆形分块模糊图像渐变拼接结果

Fig. 6 (a) the gradual splicing results of the rectangle-sectioned blurred image; (b) Gradual splicing results of the circle-sectioned blurred image

表 1 复原图像质量评价

Table 1 Quality assessment of the restored images

	Fig. 1(b)	Fig. 2(a)	Fig. 3(a)	Fig. 6(a)	Fig. 1(c)	Fig. 2(b)	Fig. 3(b)	Fig. 6(b)
Entropy	2.282	2.2913	2.3102	2.2917	2.2791	2.286	2.3163	0.2883
MSE	157.30	99.366	189.88	45.370	102.82	45.960	838.52	27.307
PSNR	4.1961	8.186	2.5611	14.995	7.8895	14.883	10.340	19.406
SSIM	0.7282	0.8138	0.7559	0.8727	0.7899	0.8797	0.7583	0.9096
MSSIM	0.8319	0.8888	0.8326	0.9327	0.8762	0.9367	0.8104	0.9539

图 7 是城市遥感图像, 同样使用渐变拼接的方法进行处理, 对比图 7(a)和图 7(b), 图 7(c)和图 7(d), 可以明显看到渐变拼接后像质的提高。当然, 对于实际的图像复原, 图像分块方式及大小的选

择, 每个图像块 PSF 的确定, 等晕区边界外延的多少, 保留的重叠区域的大小等等, 都需要针对每幅图像的具体情况来设定和计算, 这些参数的确定都是需要进一步深入的研究方向。

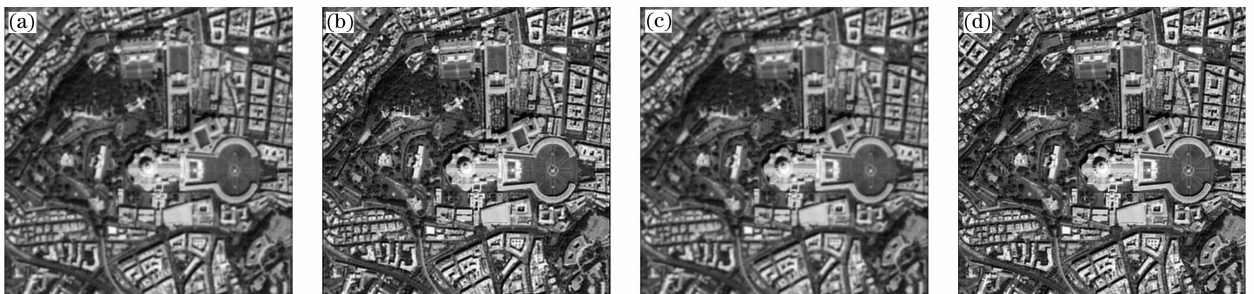


图 7 (a) 矩形分块模糊图像; (b) 矩形分块模糊图像渐变拼接结果; (c) 圆形分块模糊图像; (d) 圆形分块模糊图像渐变拼接结果

Fig. 7 (a) Rectangle-sectioned blurred image; (b) gradual splicing results of the rectangle-sectioned blurred image; (c) circle-sectioned blurred image; (d) gradual splicing results of the circle-sectioned blurred image

## 5 结 论

介绍了一种基于分块处理的空间变化 PSF 图像复原的方法。图像分块的边界不是等晕区边界, 而是往外延伸, 使得相邻图像块有部分重叠, 重叠区域一般要大于 PSF 卷积核。每个图像块在使用传统空间不变复原算法处理之后先去除明显可分辨的振铃波纹分布区域, 然后进行拼接, 其中, 相邻

图像块重叠区域的像素需要进行加权叠加, 加权系数与该像素到等晕区边界的距离有关。这种渐变拼接的方法能有效消除分块图像边界附近振铃波纹, 同时也平滑了不同图像块间灰度的过渡, 明显提高了像质。该方法在众多退化函数随视场而发生变化的图像处理中, 如遥感图像、医学图像复原等, 均能广泛应用。

## 参 考 文 献

- 1 Gonzalez, R. C., Woods, R. E. Digital Image Processing Second Edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
- 2 Zou Mouyan. Deconvolution and Signal Recovery [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001  
邹谋炎. 反卷积和信号复原, 国防工业出版社, 北京, 2001
- 3 Alexander A. Sawchuk. Space-variant image motion degradation and restoration[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1972, **60**(7): 854~861
- 4 Alexander A. Sawchuk. Space-variant system analysis of image motion[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**(9): 1052~1063
- 5 Alexander A. Sawchuk. Space-variant image restoration by coordinate transformations[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(2): 138~144
- 6 Jain K. A., Angel S. E. Restoration of images degraded by spatially varying point spread functions by a conjugate gradient method[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(14): 2186~2190
- 7 John W. Woods, Clark H. Radewan. Kalman filtering in two dimensions[C]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1977, **IT-23**(4): 473~482
- 8 John W. Woods. Correction to Kalman filtering in two dimensions[C]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1979, **IT-25**(5): 628~629
- 9 John W. Woods, Vinay K. Ingle. Kalman filtering in two dimensions; further results[C]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, **ASSP-29**(2): 188~197
- 10 H. J. Trussell, B. R. Hunt. Image restoration of space variant blurs by sectioned methods[C]. *IEEE Trans. Acoustics, Speech Signal Process*, 1978, **26**: 608~609
- 11 H. J. Trussell, B. R. Hunt. Sectioned methods for image restoration[C]. *IEEE Trans. Acoustics, Speech Signal Process*, 1978, **26**: 157~164
- 12 James G. Nagy, V. Paul Pauca, Robert J. Plemmons *et al.*. Space-varying restoration of optical image[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, **14**(12): 3162~3174
- 13 Thomas P. Costello, Wasfy B. Mikhael. Efficient restoration of space-variant blurs from physical optics by sectioning with modified Wiener filtering[J]. *Digital Signal Processing*, 2003, **13**(1): 1~22
- 14 Leah Bar, Nir Sochen, Nahum Kiryati. Restoration of images with piecewise space-variant blur [M]. *Berlin Heidelberg: Springer-Verlag*, 2007, 533~544
- 15 Mohammad Faisal, Aaron D. Lanterman, Donald L. Snyder. Implementation of a modified richardson-lucy method for image restoration on a massively parallel computer to compensate for space-variant point spread of a charge-coupled-device camera[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1995, **12**(12): 2593~2603
- 16 James G. Nagy, Dianne P. O'Leary. Restoring images degraded by spatially variant blur[J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1998, **19**(4): 1063~1082
- 17 Tod R. Lauer. Deconvolution with a spatially-variant PSF[C]. *The International Society for Optical Engineering Proceedings of SPIE*, 2002, 4847
- 18 Mats G. Lofdahl. Multiframe deconvolution with space-variant point-spread functions by use of inverse filtering and fast Fourier transform[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(21): 4686~4693
- 19 Xu Boqing, Li Xinxin. Space-variant model of imaging and its inverse filtering in space domain[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(6): 2162~2163  
徐伯庆, 李鑫欣. 成像系统的空变模型及其空域逆滤波[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(6): 2162~2163
- 20 Wen Yumei, Li Ping. The image filtering with polynomial approximation and the image recovery in spatially variant systems [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, **8**(A)(9): 1021~1027  
文玉梅, 李平. 用多项式近似的图象逆滤波及空间移变系统图象的恢复[J]. *中国图像图形学报*, 2003, **8**(A)(9): 1021~1027
- 21 Li Yong, Li Ping, Wen Yumei. Energy-constrained polynomial for opto-electronic imaging systems [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, **25**(4): 417~420  
李勇, 李平, 文玉梅. 光电成像系统获取图像的多项式能量约束复原[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**(4): 417~420
- 22 Li Yong, Li Ping, Wen Yumei. Constrained least-square restoration of space-variant blurs resulting from optical imaging systems[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, **11**(8): 1180~1187  
李勇, 李平, 文玉梅. 光学成像系统空间移变降质的最小二乘约束复原[J]. *中国图像图形学报*, 2006, **11**(8): 1180~1187