

基于哈特曼-夏克波前传感器的模糊图像复原方法

余玉华 董文德 徐之海 冯华君 李 奇

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 离焦模糊图像的清晰度较低,因此必须对其进行复原。传统方法通常采用圆盘或高斯函数来近似离焦造成的点扩散函数,复原效果不够理想。为此,提出利用哈特曼-夏克波前传感器探测离焦波前,根据所得波前计算光学系统的点扩散函数,并采用 Richardson-Lucy 算法对模糊图像进行复原。搭建了实验用的光学系统,采集了离焦模糊图像以及相应的波前信息,获得了清晰的复原图像,并利用客观图像评价方法对退化图像和复原图像进行了评价,同时与传统方法得到的复原图像进行了比较。实验结果表明,该方法能精确重建点扩散函数,有效提高图像的质量。

关键词 成像系统;离焦复原;哈特曼-夏克波前传感器;图像模糊;点扩散函数

中图分类号 TP753 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0828005

Method for Blurred Image Restoration Based on Hartmann-Shack Wavefront Sensor

Yu Yuhua Dong Wende Xu Zhihai Feng Huajun Li Qi

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

Abstract Since blurred image caused by defocus is of low clarity, image restoration is necessary. For traditional methods, circular disk or Gaussian function is adopted to approximate point spread function (PSF) caused by defocus, and the restored image is not ideal. Therefore, a method using Hartmann-Shack wavefront sensor to detect the wavefront distorted by defocus, calculating the PSF of the optical system with the obtained wavefront, and adopting the Richardson-Lucy algorithm to deblur the degraded image is proposed. An experimental system is built, from which both the blurred image and the corresponding wavefront information are collected. Clear restored images are obtained. Objective image quality assessment methods are used to evaluate the degraded and restored images. In addition, the restored images are also compared with the results obtained by traditional methods. Experimental results show that the proposed method can accurately reconstruct the PSF, and the quality of the image is efficiently improved.

Key words imaging systems; defocus restoration; Hartmann-Shack wavefront sensor; image blurring; point spread function

OCIS codes 280.4788; 120.4820; 110.2960

1 引 言

哈特曼-夏克波前传感器的发明是为了提高从地球上拍摄的卫星图像的清晰度^[1]。1990 年,

Primot 等^[2]提出用哈特曼-夏克波前传感器测量波前,以补偿大气湍流引起的图像退化。饶长辉等^[3,4]提出基于哈特曼-夏克波前探测的图像解卷

收稿日期: 2012-02-15; 收到修改稿日期: 2012-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61107009,61178064)资助课题。

作者简介: 余玉华(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学图像处理和图像复原等方面的研究。

E-mail: yuhua726@163.com

导师简介: 冯华君(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事成像系统和遥感等方面的研究。E-mail: fenghj@zju.edu.cn (通信联系人)

积,模拟点光源和扩展光源的图像退化复原。他们主要将哈特曼-夏克波前传感器运用于自适应光学,目的是观察星体时能够获得清晰度较高的图像。胡边等^[5]利用增量维纳滤波法对图像进行解卷积,在室内模拟点源的情况下,恢复的图像达到衍射极限分辨力。2009年,Rao等^[6]研制了一套37单元太阳自适应光学系统,采用基于绝对差分算法的相关哈特曼-夏克波前探测器,获取到太阳目标的高分辨力图像。在人眼自适应光学系统领域,Liang等^[7]将哈特曼-夏克波前传感器应用于人眼波前误差的探测,随后Liang等^[8]利用哈特曼-夏克波前传感器和天文观测用的37单元变形镜反射镜,组建了可用于人眼观测的自适应光学系统。实现了对人眼眼底视网膜的形状探测,为人眼视力矫正奠定了基础。张雨东等^[9]在人眼视网膜成像仪、自适应光学相干层析和自适应光学共焦扫描检眼镜等领域开展了长期研究,并先后建立了多套系统,获得了人眼视网膜的清晰图像^[10~12]。

依据哈特曼-夏克波前传感器的工作原理,综合分析离焦模糊产生的原因,本文提出一种基于哈特曼-夏克波前传感器的离焦模糊图像复原方法。利用哈特曼-夏克波前传感器探测光瞳上的离焦波前,通过相关方法计算光学系统的离焦退化函数,采用Richardson-Lucy(RL)算法对模糊图像进行复原。为了证明该方法的有效性,利用无参考评价函数,即灰度平均梯度算法(GMG)和拉普拉斯算法对复原图像进行了评价。结果表明该方法能准确重建离焦造成的点扩散函数,得到高质量的复原图像。

2 基于波前传感的图像恢复原理

哈特曼-夏克波前传感器是由微透镜阵列、匹配透镜和电荷耦合器件(CCD)组成的波前检测器件。其探测波前原理如图1所示。

若一束光束入射到哈特曼-夏克波前传感器上,微透镜阵列上波前将被分成许多微小的部分。每部分光波经过小透镜后都会聚到相应的焦平面上,得到一系列由光斑组成的平面。当入射光波为理想的平面波时,在微透镜阵列焦点处得到的将是一组均匀且规则分布的光斑;当入射光波波前存在畸变时,在微透镜阵列焦点处得到光斑将不再是均匀分布,而是与前述理想平面波波前的光斑存在偏移。哈特曼-夏克波前传感器的CCD给出每个子孔径范围内的光强分布,一般采用模式法求解波前,即根据泽尼克多项式,

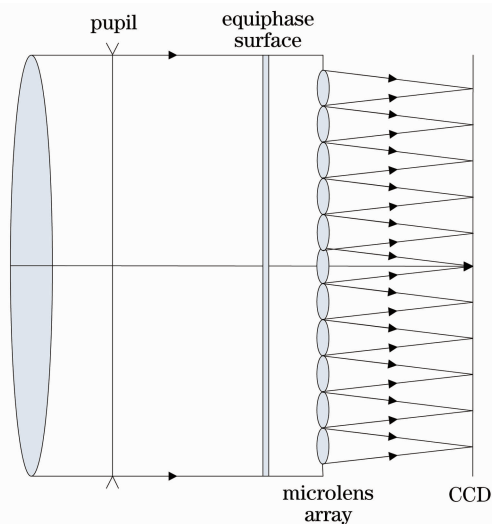


图1 微透镜阵列分割波前原理

Fig. 1 Principle of wavefront division by micro-lens array

计算通过每一个子孔径质心得到波前相位^[13]。

2.1 求解波前横纵方向平均斜率

采用灰度平均法计算每个子孔径质心的横坐标和纵坐标,并且忽略子孔径的闪烁效应,用连续积分代替离散值总和,根据Parseval理论以及傅里叶变换的属性,得

$$\iint_{A_s} \frac{\partial \phi}{\partial u} du dv = \frac{2\pi A_s x_c}{2\lambda f}, \quad (1)$$

式中 x_c 为子孔径质心的横坐标, f 为子孔径的焦距, A_s 为子孔径的面积, $\iint_{A_s} \frac{\partial \phi}{\partial u} du dv$ 表示相位对横坐标的一阶导数在面积 A_s 上的积分。

2.2 根据模式法重建波前

前面得到了每个子孔径波前在两个垂直方向上的 $2k$ 个对水平(u)、垂直(v)的平均斜率 $\frac{\partial \phi}{\partial u_j}$ 、 $\frac{\partial \phi}{\partial v_j}$,其中 $j = 1, 2, \dots, k$,下面采用模式法重构波前。 L 个子孔径函数($Z_i, i = 1, 2, \dots, L$)的相位为

$$\phi = \sum_{i=1}^L a_i Z_i, \quad (2)$$

式中 a_i 为系数。通过求得的波前斜率展开系数 $a_i, i = 1, 2, \dots, L$ 。(2)式分别对 u, v 求导,有

$$\frac{\partial \phi}{\partial u_j} = \sum_{i=2}^L a_i \frac{\partial Z_i}{\partial u_j}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial v_j} = \sum_{i=2}^L a_i \frac{\partial Z_i}{\partial v_j}, \quad (3)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, L; j = 1, 2, \dots, k$ 。(3)式可改写为

$$\mathbf{g} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{a}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{g} 为包含 u, v 的长度为 $2k$ 的向量; \mathbf{B} 为 $2k \times L$ 的斜率矩阵; \mathbf{a} 为长度为 L 的向量。(4)式对应于一

个超定组,若 \mathbf{B} 为满秩矩阵,且 $\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{B}$ 条件数较小,最小二乘解为

$$\mathbf{a} = (\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{B})^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{g}, \quad (5)$$

其中 $(\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{B})^{-1} \cdot \mathbf{B}$ 是 \mathbf{B} 的广义逆矩阵。

2.3 计算退化函数

根据微透镜阵列上的圆形孔径的波前分布情况,可以计算系统瞬时退化函数(PSF)^[14]。对孔径和波前相位分布进行互相关计算,表示为

$$H(f) = \frac{\int W(x) \cdot W(x - \lambda d_i f) \exp[j\phi(x)] \exp[j\phi(x - \lambda d_i f)] dx}{\int |W(x)|^2 dx}, \quad (6)$$

式中 λ 为光源波长,取白光的中心波长 550 nm, f 为空间频率, d_i 为成像系统的焦距, ϕ 为根据哈特曼-夏克波前传感器测量的光斑图像重构出来的波前相位, $W(x)$ 为光瞳函数,即

$$W(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq D/2 \\ 0, & |x| > D/2 \end{cases} \quad (7)$$

光瞳函数中 D 为系统光瞳直径。

2.4 图像恢复

图像产生、记录和传输过程中,不可避免地存在某些失真与退化。日常生活中由于手持相机产生的抖动,调焦不准或成像系统质量问题,大部分成像系统成像过程都会产生或轻或重的模糊,在一定程度上影响了人们对图像中重要信息的提取。所以如何从退化图像中恢复清晰图像至关重要。

假设原图像为 $m(x, y)$, 与退化函数 h 卷积,再叠加噪声,就得到一幅退化图像。 h 是一个线性、空间不变的退化函数。图像退化过程可以表示为

$$e(x, y) = h(x, y) \otimes m(x, y) + n(x, y), \quad (8)$$

式中 $m(x, y)$ 为原图像, $h(x, y)$ 为系统退化函数,

“ \otimes ”表示空间卷积, $n(x, y)$ 为噪声, $e(x, y)$ 为退化图像。本文选择 RL 算法^[15,16]对离焦模糊图像复原。

3 实验装置

为了验证哈特曼-夏克波前传感器测量的波前对于离焦模糊图像复原的有效性,搭建如图 2 所示的光学系统。点光源发光二极管(LED)发出的点光经过准直透镜,成为平行光照射在模拟的目标物上。采用特定的幻灯底片作为目标物。光束透过目标物体后,利用长度为 1 m 的平行光管进行准直。准直之后,在系统中加入偏正分光棱镜将光束分为两束,其透射光在相机上成像;反射光照射到哈特曼-夏克波前传感器上,并且记录 CCD 上的图像。实验中由于波前探测器的曝光特性,与成像曝光的时间不一致,导致波前传感器与相机曝光时间无法同步。然而在该光学系统中只存在静态像差,所以在短时间内不会影响波前信息与相机成像的一一对应关系。

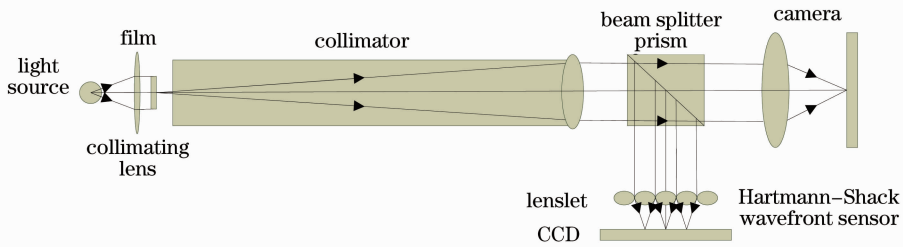


图 2 波前探测及图像复原装置

Fig. 2 Experimental system for wavefront sensing and image restoration

将孔径光阑置于平行光管的物方焦平面。幻灯底片贴在视场光阑上,对相机调焦,使其成像最清晰,不再更改相机和哈特曼-夏克波前传感器的设置。前后移动光源,平行光管出射的光线将不再是平行光,而是带有一定发散或会聚角度的光线,所以在哈特曼-夏克波前传感器上测得的波前有一定离焦量。此时记录哈特曼-夏克波前传感器上的数据,

并且拍摄退化图像。根据之前得到的波前数据,计算系统的退化函数,并且记录相机上的离焦模糊图像,采用 RL 算法对模糊图像复原。

4 实验结果

4.1 扩展目标实验

用目标 1 进行两组目标位置不同时的实验,实

验结果如图 3 所示,图 3(a)是正确对焦时相机上获得的清晰图像。图 3(b)~(e)是在离焦位置 1 记录的数据,图 3(b)是光波波前的三维图, x, y 所在平面为光瞳平面,该平面内每个坐标点代表一个子孔径的位置,子孔径直径为 $146 \mu\text{m}$, z 坐标为波前畸变量,单位为微米,此时波前在子孔径范围内的峰谷值等于 $0.4164 \mu\text{m}$,图 3(c)是在离焦位置 1 得到的退化函数,图 3(d)是相机上拍摄的离焦图像,相对于正确对焦位置的时候图像有一定的模糊,图 3(e)

是对图 3(d)的复原结果,直观上可以看出现代两字比退化的图像更加清晰。图 3(f)~(i)是在离焦位置 2 记录的数据,此时波前在子孔径范围内的峰谷值等于 $0.7205 \mu\text{m}$,图 3(f)是此时的光波波前,图 3(g)是退化函数,图 3(h)是相机上拍摄的离焦图像,相对于离焦位置 1,由于离焦更大,得到的图像明显更模糊,图 3(i)是对图 3(h)的复原结果,有效地去除了图 3(h)中存在的模糊,图像边缘更加清晰。

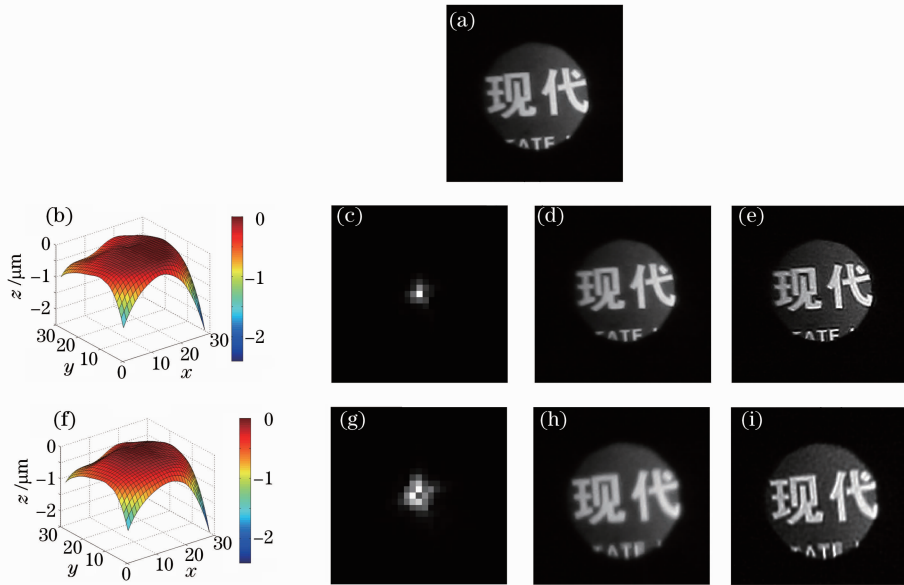


图 3 目标 1 的图像。(a)正确对焦时的图像;(b)离焦位置 1 的波前;(c)离焦位置 1 的 PSF;(d)离焦位置 1 的模糊图像;(e)离焦位置 1 的复原图像;(f)离焦位置 2 的波前;(g)离焦位置 2 的 PSF;(h)离焦位置 2 的模糊图像;(i)离焦位置 2 的复原图像

Fig. 3 Images of target 1. (a) In-focus image; (b) wavefront of defocus position 1; (c) PSF of defocus position 1, (d) blurred image of defocus position 1; (e) restored image of defocus position 1; (f) wavefront of defocus position 2; (g) PSF of defocus position 2; (h) blurred image of defocus position 2; (i) restored image of defocus position 2

图 3 的目标物是汉字,下面是利用目标 2 进行模糊图像复原的实验,实验结果如图 4 所示。可以看到随着离焦量变大,图像变得更加模糊,许多细节信息甚至无法分辨,PSF 弥散得更大,经过图像复原之后,从视觉上看,离焦位置 1 的图像已经可与正确对焦位置时相机拍摄的图像相媲美。离焦位置 2 上的复原图像质量也有明显地改善,从而可以更加轻松地利用图像获取感兴趣的信息。

4.2 实验分析

表 1 是针对目标 1 的客观评价得出的数据。给出了用 GMG 和拉普拉斯算法对模糊图像和复原图像的评价数据,评价值越大表示清晰度越好,图像质

量越高。离焦位置 1 模糊图像的 GMG 评价因子数值与离焦位置 2 的 GMG 接近,拉普拉斯算法评价因子数值更大,说明离焦位置 2 的离焦比较大,从而得到的图像在细节纹理方面较离焦位置 1 的差。从复原的图像来看,离焦位置 1、2 的复原图像的 GMG 和拉普拉斯算法的评价因子数值都有了一定的提高,从客观上证明了本文提出的方法在模糊图像复原上的有效性。表 2 是针对目标 2 的图像评价。显然相对于模糊图像,复原图像在数值上都有了显著地提高,说明图像的细节信息更加丰富,与人眼直观观测的结果是一致的,人们可以更方便地从图像中获取感兴趣的区域。

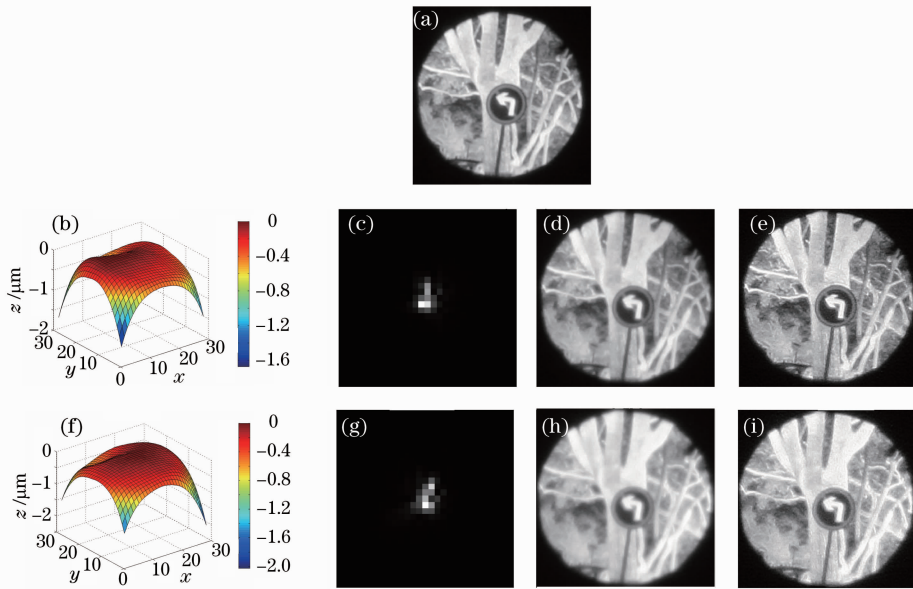


图 4 目标 2 的图像。(a)正确对焦时的图像；(b)离焦位置 1 的波前；(c)离焦位置 1 的 PSF；(d)离焦位置 1 的模糊图像；(e)离焦位置 1 的复原图像；(f)离焦位置 2 的波前；(g)离焦位置 2 的 PSF；(h)离焦位置 2 的模糊图像；(i)离焦位置 2 的复原图像

Fig. 4 Images of target 2. (a) In-focus image; (b) wavefront of defocus position 1; (c) PSF of defocus position 1; (d) blurred image of defocus position 1; (e) restored image of defocus position 1; (f) wavefront of defocus position 2; (g) PSF of defocus position 2; (h) blurred image of defocus position 2; (i) restored image of defocus position 2

表 1 目标 1 退化与复原图像的 GMG 和拉普拉斯算法

Table 1 GMG and Laplacian of blurred and deblurred images of target 1

Position	GMG		Laplacian	
	Blurred image	Deblurred image	Blurred image	Deblurred image
Defocus 1	0.0132	0.0244	0.0494	0.1216
Defocus 2	0.0133	0.0226	0.0399	0.0881

表 2 目标 2 退化与复原图像的 GMG 和拉普拉斯算法

Table 2 GMG and Laplacian of blurred and deblurred image of target 2

Position	GMG		Laplacian	
	Blurred image	Deblurred image	Blurred image	Deblurred image
Defocus 1	0.0198	0.0356	0.0563	0.1517
Defocus 2	0.0179	0.0305	0.0492	0.1249

用圆盘离焦模型和高斯离焦模型对实验中的模糊图像复原,将所复原图像与本文提出的基于哈特曼-夏克波前传感器得到的复原图像对比,结果如图 5 所示。图 6 给出了图 5 中红色区域(彩图请见网络电子版)中的图像。在针对目标 1 的实验结果中,截取“现”作为感兴趣的区域。在离焦 1 位置,本文提出的方法在保持边缘的效果上优于圆盘离焦和高斯离焦模型。在离焦 2 位置,圆盘离焦模型的复原图像边界模糊较大,振铃明显,字体部分能量分布较不均衡,虽然高斯离焦模型复原的图像的边缘比

圆盘离焦模型更好,但仍不够理想。本文方法的复原图像能量分布更加均衡,边界更加清晰,抑制振铃的效果也更加明显。在针对目标 2 的实验结果中,截取中间部分。在离焦 1 位置,圆盘离焦模型所得复原图像的边缘部分有明显振铃,且箭头中间能量缺失较大,高斯离焦模型复原的图像有一定的改善,而本文提出的方法更好地抑制了振铃,边缘也更加清晰。在离焦 2 位置,本文方法所得的复原图像的边缘比传统方法获得的图像边缘更加尖锐、清晰。由此可知,从主观上看本文提出方法的稳健性较好,

能更好地保持图像边缘,有效抑制振铃,提高图像的分辨率。

计算每幅图像的 GMG 和拉普拉斯算法的评价值,如表 3 所示。根据本文提出的方法得到的复原

图像的客观评价数值均大于圆盘和高斯离焦模型复原所得的图像,这也从客观上说明该方法得到的复原图像质量更好,清晰度更高。

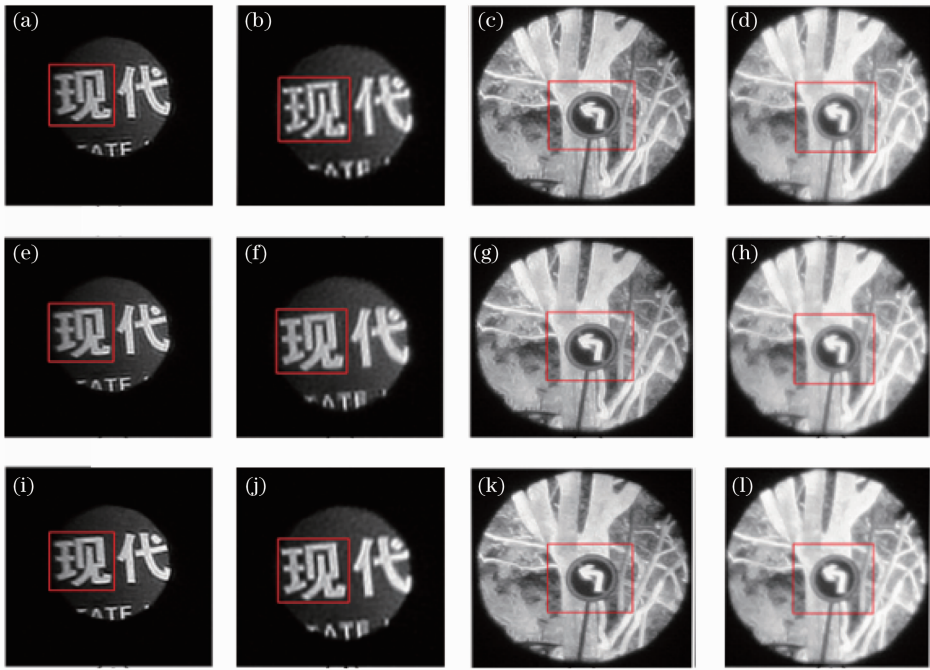


图 5 (a)~(d)利用圆盘离焦模型得到的复原图;(e)~(h)利用高斯离焦模型得到的复原图;
(i)~(l)利用本文提出的方法得到的复原图

Fig. 5 (a)~(d) Deblurred images using circular defocus model; (e)~(h) deblurred images using Gaussian defocus model; (i)~(l) deblurred images with the method proposed

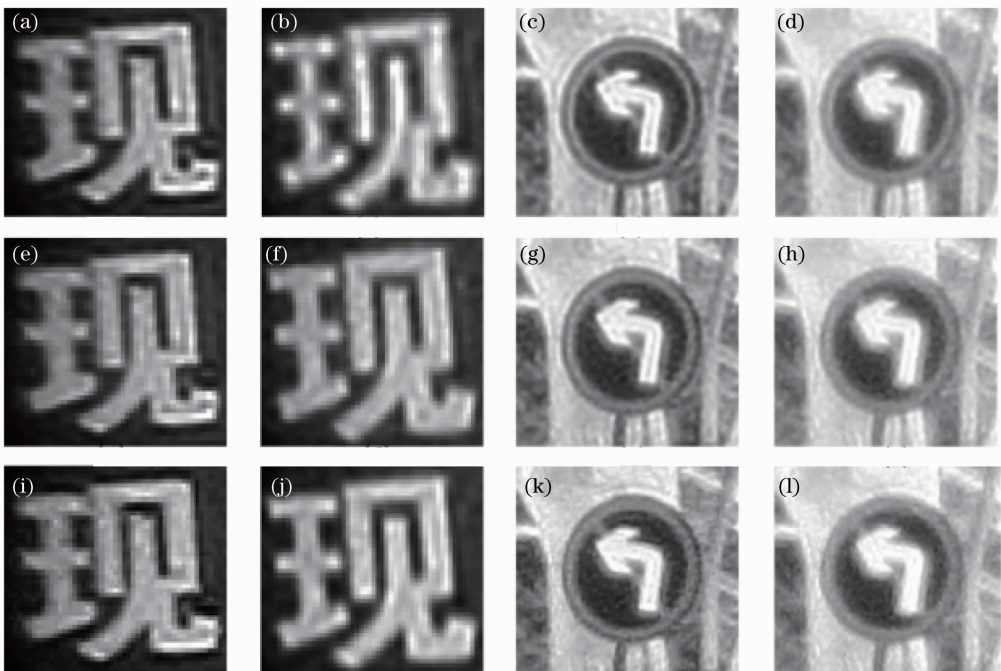


图 6 图 5 中红框区域对应的小图像

Fig. 6 Sub-images in the red rectangles of Fig. 5

表3 本文复原方法与圆盘和高斯离焦模型复原方法的客观评价
Table 3 Objective image quality evaluation of the deblurred images

Target	Model	GMG			Laplacian		
	Position	Circular	Gaussian	Proposed	Circular	Gaussian	Proposed
Target 1	Defocus 1	0.0240	0.0227	0.0244	0.1185	0.1144	0.1216
	Defocus 2	0.0217	0.0210	0.0226	0.0743	0.0836	0.0881
Target 2	Defocus 1	0.0318	0.0309	0.0356	0.1087	0.1092	0.1517
	Defocus 2	0.0254	0.0261	0.0305	0.0862	0.0907	0.1249

5 结 论

提出了将哈特曼-夏克波前传感器应用于离焦模糊图像复原的方法。搭建了实验用的光学系统,通过移动物方扩展物体的位置,产生不同程度的离焦模糊图像,并利用哈特曼-夏克波前传感器探测波前计算得到相应的退化函数。根据该退化函数,采用RL算法对模糊图像进行复原,并将所得的复原图像与圆盘离焦模型和高斯离焦模型的复原结果进行了对比。实验结果表明,该方法在测量光学系统的退化函数和复原模糊图像上取得了很好的效果。

参 考 文 献

- B. C. Platt, R. Shack. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. *J. Refractive Surgery*, 2001, **17**: S573~S577
- J. Primot, G. Rousset, J. C. Fontanella. Deconvolution from wavefront sensing; a new technique for compensating turbulence-degraded images [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(9): 1598~1608
- Rao Changhui, Zhang Xunjun, Jiang Wenhan. Image deconvolution based on Hartmann-Shack wavefront sensing; indoors experimental results [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 789~792
饶长辉, 张学军, 姜文汉. 基于哈特曼-夏克波前探测的图像解卷积:室内结果[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 789~792
- Chen Ke, Zhao Da. Study and experiments on extended beacon wavefront detection for adaptive optics [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(5): 387~390
陈珂, 赵达. 自适应光学中扩展信标波前探测的研究与实验[J]. *光学技术*, 2001, **27**(5): 387~390
- Hu Bian, Rao Changhui. The application of incremental wiener filters in image deconvolution of wavefront sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1305~1309
胡边, 饶长辉. 增量维纳滤波法在波前探测解卷积中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1305~1309
- C. H. Rao, L. Zhu, X. J. Rao *et al.*. 37-element solar adaptive optics for 26 cm solar fine structure telescope at Yunnan astronomical observatory[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(10): 966~968
- J. Z. Liang, B. Grimm, S. Goetz *et al.*. Objective measurement of the wave aberration of human eye with the use of a Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(6): 1949~1957
- J. Z. Liang, D. R. Williams, D. T. Miller. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(11): 2884~2892
- Zhang Yudong, Jiang Wenhan, Shi Guohua *et al.*. Application of adaptive optics in ophthalmology[J]. *Science in China (Series G)*, 2007, **37**(B10): 68~74
张雨东, 姜文汉, 史国华等. 自适应光学的眼科学应用[J]. *中国科学:G辑*, 2007, **37**(B10): 68~74
- Ling Ning, Zhang Yudong, Rao Xuejun *et al.*. A small adaptive optical imaging system for cells of living human retina [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1153~1158
凌宁, 张雨东, 饶学军等. 用于活体人眼视网膜观察的自适应光学成像系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1153~1158
- Guohua Shi, Yun Dai, Ling Wang *et al.*. Adaptive optics optical coherence tomography for retina imaging[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 424~425
- J. Lu, H. Li, L. Wei *et al.*. Retina imaging in vivo with the adaptive optics confocal scanning laser ophthalmoscope [C]. *SPIE*, 2009, 7519: 751911
- Zhang Kun, Hong Hanyu, Sun Xiechang *et al.*. Survey of image deconvolution from wavefront sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 131~134
张坤, 洪汉玉, 孙协昌等. 基于波前测量的图像复原技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(1): 131~134
- M. C. Roggemann, B. M. Welsh. Imaging through turbulence [M]. New York: CRC Press, 1996
- W. H. Richardson. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(1): 55~59
- L. B. Lucy. An iterative technique for the rectification of observed distributions[J]. *Astronomical Journal*, 1974, **79**(6): 745~754

栏目编辑: 李文喆