

文章编号: 0258-7025(2010)02-0514-07

一种基于双边滤波的 $4f$ 光学系统图像去噪方法

邱 宇 田逢春 陈建军 李 鹏

(重庆大学通信工程学院, 重庆 400030)

摘要 在采用相干光源照明的常规 $4f$ 光学系统中, 输出图像极易受到镜头及 CCD 上的灰尘污点的影响而造成图像降质。针对该问题, 将图像降质原因划分为加性随机噪声、污点、光源不均匀性影响以及系统的低通特性, 提出一种简化系统模型。利用系统输入全白图像的输出结果作为先验信息, 在假定一次实验中污点和光源保持不变的基础上, 确定其分布。提出一种改进的自适应双边滤波算法, 以达到实现去除噪声和污点的目的。基于光学实拍图像和人工合成图像的实验表明, 该算法能够在保持图像细节的同时较好地去除噪声, 进而恢复图像, 实现主观视觉质量和峰值信噪比 (PSNR) 的提高; 同时在污点污染严重的情况下该算法具有较好的稳健性。

关键词 图像处理; 去噪; 双边滤波; $4f$ 系统; 先验信息

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0514

An Improved Denoising Method for $4f$ Optical System Based on Bilateral Filter

Qiu Yu Tian Fengchun Chen Jianjun Li Peng

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract In optical $4f$ system with coherent illumination source, the output images are easily contaminated by dusts and spots in the surface of lens and charge coupled device (CCD). With the image degradation factors being classified by additive stochastic noise, spots, illumination ununiformity and system low-pass characterization, a simplified model is proposed. The output result is used as apriori information when the input is a full white image to calculate the distribution of spots and illumination ununiformity of which stabilization is assumed in an experiment. An improved adapted bilateral filter is therefore introduced to denoise and remove spots. The optical and synthetic image experiments show that the proposed method can effectively reduce noise and restore image with edge sharpness being preserved. The robust characterization of the proposed method is embodied by the simulation results even under the serious spot-contamination circumstance.

Key words image processing; denoising; bilateral filter; $4f$ system; apriori information

1 引 言

与传统的信息处理手段相比, 光信息处理有着速度快、并行性和大容量的优点。但由于光学器件精度的限制以及照明不均匀, CCD 及透镜表面灰尘和污点, 传感器热噪声等因素影响, 导致光学系统成像质量不高, 输出图像出现一定程度的降质。因此去除噪声, 恢复原图像信息成为该领域中的一个热点。

目前研究者们针对随机噪声的去除提出了很多

方法, 除 Yaroslavsky 邻域滤波^[1]、双边滤波^[2,3]、非邻域均值滤波^[4,5]、各向异性滤波^[6~8]等空域滤波算法之外, 还有基于小波变换的变换域去噪算法^[9~11]。近年来, 基于多尺度几何分析的 Curvelet 变换^[12]和 Contourlet 变换等也被广泛运用到图像去噪领域^[13]。其中双边滤波由于算法复杂度低, 图像边缘保持较好等特点, 近年来得到了广泛的运用, 并衍生出很多改进算法^[14~17]和快速算法^[18]。但这

收稿日期: 2009-03-27; 收到修改稿日期: 2009-05-15

基金项目: 中国博士后科学基金(20080430096)资助项目。

作者简介: 邱宇(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事光学图像处理方面的研究。E-mail: qiuyu@cqu.edu.cn

导师简介: 田逢春(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信息光学、图像信息处理、小波理论等方面的研究。

E-mail: FengchunTian@cqu.edu.cn(通信联系人)

些算法都是后期数字图像处理方法,采用的是人为加噪声再去噪声的方式来判定算法性能,而没有利用到光学系统本身的系统先验知识。又因为实际的光学系统并不一定具有良好的线性空不变性,所以在这样的光学系统中基于系统的点扩散函数实现系统分析以及去噪的方法并不一定能取得较好的效果^[19]。本文针对信息光学中的 4f 系统,介绍了一种利用系统先验信息的噪声去除算法。利用此算法恢复的图像能够在保存图像细节的同时有效地抑制噪声。最后通过 4f 系统实拍光学图片和人工合成图片验证了该算法的有效性,图像的峰值信噪比 (PSNR) 值和主观视觉质量都能得到较大提升。

2 光学 4f 系统及其噪声模型

信息光学中典型的 4f 系统如图 1 所示, f 为透镜焦距, S 为相干点光源, L_0 为准直透镜, P_1 为输入平面,其上放置空间光调制器 (SLM) 来加载输入图像。该输入经傅里叶透镜 L_1 做傅里叶变换,在 P_2 面得到其频谱。在 P_2 面放置另一个 SLM,其上加载所需频域滤波器,经滤波后再通过第二个傅里叶透镜 L_2 做傅里叶逆变换,在 P_3 面上得到输出图像,用 CCD 采集该图像并转换成电信号进行后处理。

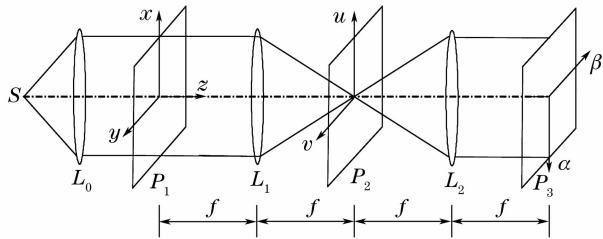


图 1 光学 4f 系统

Fig. 1 Optical 4f system

由于采用相干光源照明,透镜及 CCD 上的污点灰尘使输出图像出现污斑,光源的不均匀性导致采集到的图像明暗不均。图 2 为一次实验过程中在输入面 P_1 输入 Lena 和全白图片得到的输出图像。可以明显看出在全白图像中,光源的不均匀性使得本应灰度一致的图像变得亮暗不均,同时还存在污点和随机噪声的污染。

在同一次实验所拍摄的图片中,假定污点的位置和大小均不变,同时光源的不均匀性也没有发生变化,则图 2(b) 的全白图像可视为先验知识加以利用。

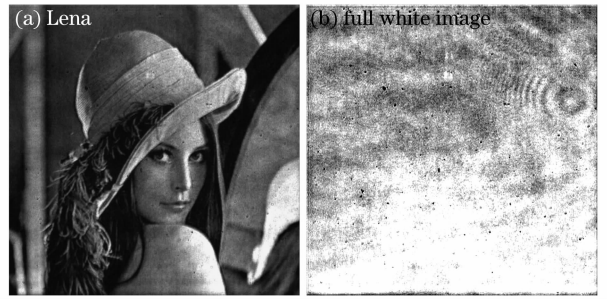


图 2 CCD 采集到的光学 4f 系统输出图像

Fig. 2 Output images of 4f system captured by CCD

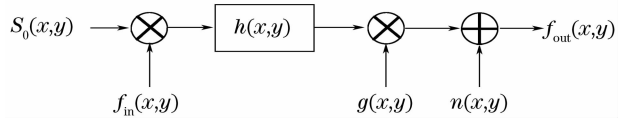


图 3 4f 系统简化模型

Fig. 3 Simplified model of 4f system

实际的 4f 系统的噪声情况和系统传递函数非常复杂,包含着系统器件的物理特性。为简单计,将 4f 系统看成一个整体,仅将光源分布、污点分布和加性噪声分离出来。系统的简化模型如图 3 所示。

图 3 中,传递函数定义为 $h(x,y)$,理想情况下它应是冲激函数,但是由于透镜孔径等因素的影响,实际上是一个具有低通特性的函数。光源 S 通过准直透镜 L_0 后的分布定义为 $S_0(x,y)$,输入平面 P_1 面上通过 SLM 加载的输入图像为 $f_{in}(x,y)$,镜头及 CCD 上的灰尘等导致的污点分布函数为 $g(x,y)$,高斯加性白噪声为 $n(x,y)$,采集到的输出函数为 $f_{out}(x,y)$ 。基于该简化模型,系统的输出可写为

$$f_{out}(x,y) = [f_{in}(x,y) \times S_0(x,y)] * h(x,y) \times g(x,y) + n(x,y), \quad (1)$$

式中 $*$ 为卷积符号。

3 噪声、污点及光源不均匀去除的实现方法

3.1 双边滤波理论

1998 年,Smith 等^[2,3]在 Gauss 滤波和 Yaroslavsky 邻域滤波^[1]的基础上提出了一种非线性滤波算法——双边滤波。该算法不仅考虑了邻域点与中心点灰度值之间的相似程度,同时考虑了二者之间的几何距离,使得该算法能够较好地保存图像边缘并有效地平滑噪声。滤波算法为

$$\hat{f}(x,y) = \frac{1}{C(x,y)} \iint_{\Omega} f(\xi,\eta) \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{d(\xi,\eta;x,y)}{\sigma_d}\right]^2\right\} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{s(\xi,\eta;x,y)}{\sigma_r}\right]^2\right\} d\xi d\eta, \quad (2)$$

式中 $\hat{f}(x, y)$ 为去噪后图像, Ω 为中心点在 (x, y) 处大小为 $(2M + 1) \times (2M + 1)$ 的邻域, $d(\xi, \eta; x, y) = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$ 为像素几何邻近度; $s(\xi, \eta; x, y) = |f(x, y) - f(\xi, \eta)|$ 为像素灰度相似度, $C(x, y) = \iint_{\Omega} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{d(\xi, \eta; x, y)}{\sigma_d}\right]^2\right\} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{s(\xi, \eta; x, y)}{\sigma_r}\right]^2\right\} d\xi d\eta$ 为归一化常数; σ_d 和 σ_r 分别为几何测度扩散标准差和灰度测度扩散标准差。

3.2 计算污点空间分布

图 2(b) 为输入全白图片时的 CCD 采集图像, 为得到其中污点的空间分布情况, 可以采用阈值算法, 当某像素点的灰度值低于阈值时便认为此点为污点, 反之, 为非污点。但由于光源的不均匀性十分明显, 图像上部偏暗, 下部偏亮, 同时加上噪声引起的波动, 就可能使得偏亮区域的污点灰度值反而高于偏暗区域的非污点灰度值, 若采用全局阈值法则容易导致误判。这里假定光源的不均匀性主要表现为大片区域的缓慢变化, 那么在一个小范围 Ω 内可视为均匀, 因此采用一种自适应局部阈值法来判断污点

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) < m(\Omega_{x,y}) - T \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\hat{f}(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{C'(x, y)} \iint_{\Omega'} f(\xi, \eta) \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{d(\xi, \eta; x, y)}{\sigma_d}\right]^2\right\} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\hat{s}(\xi, \eta; x, y)}{\sigma_r}\right]^2\right\} d\xi d\eta, & (x, y) \text{ being the spotted point,} \\ \frac{1}{C(x, y)} \iint_{\Omega} f(\xi, \eta) \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{d(\xi, \eta; x, y)}{\sigma_d}\right]^2\right\} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{s(\xi, \eta; x, y)}{\sigma_r}\right]^2\right\} d\xi d\eta, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中 Ω' 为点 (x, y) 周围邻域排除掉污点后剩下的区域, $C(x, y)$ 和 $C'(x, y)$ 均为归一化常数。若当前计算的点不是污点, 直接采用双边滤波; 若当前点是污点, 则当前点的灰度值 $f(x, y)$ 不能代表图像信息, 双边滤波中的灰度相似度 $s(\xi, \eta; x, y)$ 不再具有意义。此时可以采用两种方法对污点处灰度值 $\hat{f}(x, y)$ 进行估计: 1) 将双边滤波直接退化为高斯滤波, 优点是速度快, 缺点是由于高斯滤波的各向同性性质, 易造成图像的细节和边缘模糊。2) 利用污点处周围邻近的非污点, 先估计出污点的灰度值 $\hat{f}'(x, y)$, 再利用此估计值进行双边滤波, 得到最终估计。采用第二种方法, 目的是充分利用双边滤波的非线性特点, 最大限度地保护细节和边缘, 其中 $\hat{s}(\xi, \eta; x, y) = |f(\xi, \eta) - \hat{f}'(x, y)|$ 。污点的灰度值 $\hat{f}'(x, y)$ 的估计步骤为:

1) 以当前点为中心按正方形进行区域生长, 若区域半径用 r 表示, 则区域面积为 $(2r + 1) \times (2r + 1)$ 。

式中 0 代表污点, 1 代表非污点, $\Omega_{x,y}$ 为以 (x, y) 点为中心的 $(2L + 1) \times (2L + 1)$ 大小的邻域, $m(\cdot)$ 为取平均值函数, T 为微调参数。 T 的值太小则可能将仅由于噪声污染出现波动而非非污点的像素点判断为污点, 太大则可能出现漏检。

3.3 噪声及污点去除

由于污点处的图像信息已经被损失掉, $g(x, y) = 0$, 因此不能根据(1)式利用 $f_{\text{out}}(x, y)/g(x, y)$ 来恢复原始图像信息, 该除法带来的结果只能将黑色的污点变为白色亮点。因此提出一种自适应双边滤波算法, 根据污点位置自动调整, 同时达到去除噪声和修复污点处图像信息的效果。算法为

当区域内包含的非污点数大于等于区域半径 r 时停止生长。

2) 对区域内的非污点以标准差 $\sigma = r$ 进行高斯平均, 将该平均值作为当前污点的灰度值 $\hat{f}'(x, y)$ 。

3.4 消除光源不均匀性

对图 2(a) 的 Lena 图像和图 2(b) 的全白图片均运用(4)式的算法, 参数使用一致, 去除掉随机噪声和污点后的结果为

$$\hat{f}_{\text{out}}(x, y) = [f_{\text{in}}(x, y) \times S_0(x, y)] * h(x, y), \quad (5)$$

由于光源不均匀性分布函数 $S_0(x, y)$ 表现为大片区域的缓慢变化, 故其频谱远低于 $h(x, y)$ 截止频率, 这里将(5)式近似为

$$\hat{f}_{\text{out}}(x, y) = [f_{\text{in}}(x, y) * h(x, y)] \times S_0(x, y), \quad (6)$$

当输入为全白图片时 $f_{\text{in}}(x, y)$ 为一个全 1 矩阵, 此时的输出结果为

$$\hat{f}_{\text{out_blank}}(x, y) = S_0(x, y). \quad (7)$$

消除了噪声和污点的全白输出图像仅剩下了光源不均匀性的信息,如(7)式所示。将(6)与(7)式相除: $f_{\text{in}}(x, y) * h(x, y) = \hat{f}_{\text{out}}(x, y) / \hat{f}_{\text{out_blank}}(x, y)$,便得到恢复后的图像。

将提出的算法总结为:

1) 利用全白图像输入时的系统输出作为系统先验信息,确定污点分布。

2) 通过区域生长的方式,利用高斯平均估计污点处灰度值。

3) 对图像进行自适应双边滤波,其中全白图像的滤波结果即为光源不均匀性信息。

4) 将 Lena 图像的滤波结果除以光源不均匀性信息,得到算法最终输出。

4 实验结果与分析

4.1 光学图片实验结果

实验平台如图 4 所示,DH-HNKW250P 型 He-Ne 激光器作为光源,波长 632.8 nm;SONY lcx029 液晶板空间光调制器,分辨率 1024 pixel × 768 pixel,线对数 36 lp/mm;GCO-0203M 型消色差傅里叶变换透镜,焦距 400 mm;以及佳能 EOS 350D CCD 相机等设备构成 4f 系统实验平台。输入面加载的图像分辨率均为 616 pixel × 616 pixel 大小。由于空间光调制器的栅状结构会造成频谱复制,故在频谱面放置边长为 9 mm 的方孔以滤除多余谱点。



图 4 光学 4f 实验平台

Fig. 4 Experimental platform of optical 4f system

首先利用全白图片的输出结果确定污点的分布,实验中微调参数 T 的值选为 40, $\Omega_{x,y}$ 的半径 L 选为 11 pixel,图 5(a)为污点分布结果。对比图 2(b)和图 5(a)可以看出,算法对于污点的检测是准确和有效的。然后运用自适应双边滤波算法对该全白输出结果去噪、去污点,结果如图 5(b)所示,算法结果得到光源不均匀性信息。双边滤波邻域 Ω 半径 M 为

11 pixel, σ_d 和 σ_r 应根据图像中的噪声程度进行选择,取 $\sigma_d = 6, \sigma_r = 30$ 。再对 Lena 图运用相同参数的自适应双边滤波算法,结果如图 5(c)所示。最后用所得结果除以光源不均匀性信息得到最终结果,如图 5(d)所示。从图中可见,处理后的结果背景均匀,与原始 CCD 采集到的图像——图 2(a)相比,细节并没有明显丢失,且主观视觉效果有了很大提升。

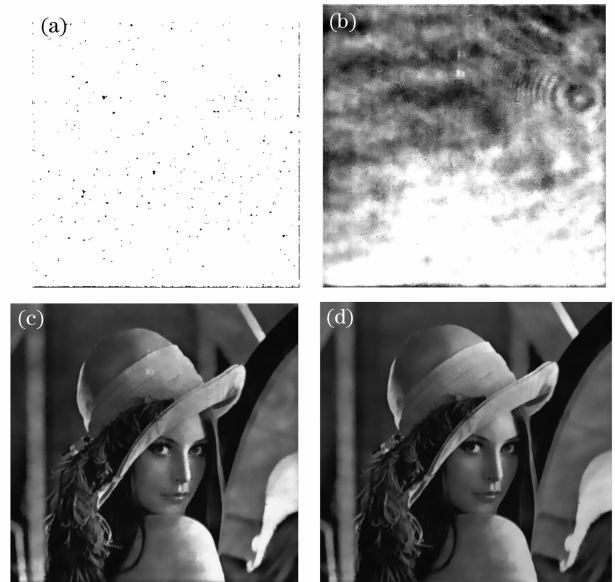


图 5 算法处理结果

Fig. 5 Optical image results

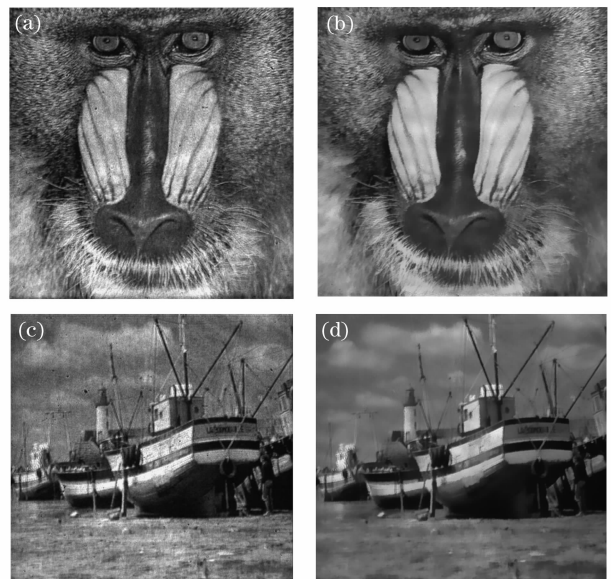


图 6 光学图片实验结果

Fig. 6 Simulation experiment for the optical images

其他光学图片实验结果如图 6 所示。图 6(a)为 Baboon 光学图片,(b)为对图(a)算法处理后结果,(c)为 Boat 光学图片,(d)为对图(c)算法处理后结果。

除主观视觉外,峰值信噪比(PSNR, R_{PSN})作为一种常用的客观评价标准,反映了图像之间的相似程度。对于8 bit图像,其计算式为

$$R_{\text{PSN}} = 20\lg(255/\epsilon), \quad (8)$$

式中 ϵ 代表原始“干净”图像与处理后图像之间的误差均方根,其定义为

$$\epsilon = \sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [\hat{f}(x,y) - f(x,y)]^2 / (M \times N)}. \quad (9)$$

表1给出了处理前后图像的 R_{PSN} 值。这里,(9)式中代表“干净”图像的 $f(x,y)$ 是利用计算机仿真,对原始图像频谱进行9 mm滤波后的结果。可以看出,不同图像经该算法处理后其 R_{PSN} 值均得到一定程度的提升。

表1 4f 系统输出图像经处理前后 PSNR(dB)值比较
Table 1 PSNR values (dB) comparison between 4f system outputs and the results of the proposed method

Input image	4f system output	Proposed method output	PSNR improvement
Lena	23.6256	27.3300	3.7044
Baboon	20.4460	22.2808	1.8348
Boat	22.0047	23.9012	1.8965

4.2 合成图片实验结果

为验证算法的有效性和稳健性,设计了两组合成图片来模拟污点、随机噪声和光源不均匀性的影

响。光源不均匀性由函数 $S_0(x,y) = 50\sin(0.05x) + 200$ 生成,污点分布 $g(x,y)$ 用手工任意画出。输入图像依次与光源不均匀性函数和污点分布函数相乘,最后加上均值为零,归一化方差为0.001的高斯白噪声得到合成图像: $f_{\text{out}} = f_{\text{in}} S_0 g + n$ 。第一组图片如图7所示,污点程度为轻度。图7(a)为合成Lena图($R_{\text{PSN}} = 17.8940$ dB), (b)为合成全白图, (c)为算法处理后结果($R_{\text{PSN}} = 31.0001$ dB), (d)为原始Lena眼部局部, (e)为合成Lena眼部局部, (f)为处理后Lena眼部局部。第二组图片如图8,图9所示,加入了重度污点污染。图8(a)为合成Lena图($R_{\text{PSN}} = 11.2328$ dB), (b)为合成全白图, (c)为算法处理后结果($R_{\text{PSN}} = 29.9222$ dB), (d)为原始Lena眼部局部, (e)为合成Lena眼部局部, (f)为处理后Lena眼部局部;图9(a)为原始Baboon脸部局部, (b)为合成Baboon脸部局部($R_{\text{PSN}} = 9.5215$ dB), (c)为处理后Baboon脸部局部($R_{\text{PSN}} = 24.7381$ dB), (d)为原始Boat桅杆局部, (e)为合成Boat桅杆局部($R_{\text{PSN}} = 9.3948$ dB), (f)为处理后Boat桅杆局部($R_{\text{PSN}} = 28.4324$ dB)。从图中可以看出,在轻度污点污染情况下,眼部细节能够很好地恢复出来;重度污染情况下,虽然细节有所丢失,但图像信息仍然能够得到较大程度的恢复。

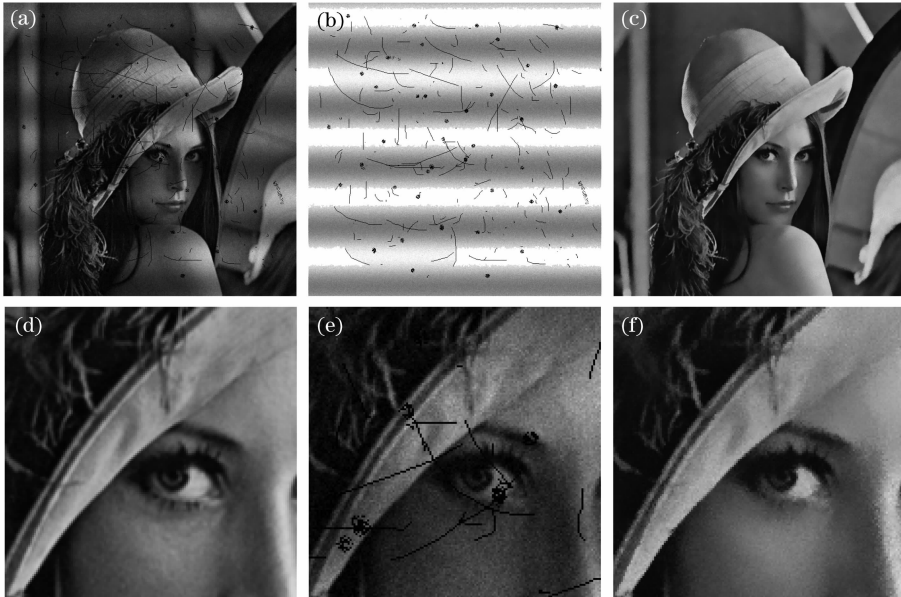


图7 合成图像处理结果(第一组)

Fig. 7 Synthetic image results of the proposed method (group one)

5 结 论

针对常规器件构成的4f光学系统输出图像产

生降质的情况,将降质因素分解为加性随机噪声、污点、光源不均匀性影响和系统的低通特性,建立相应

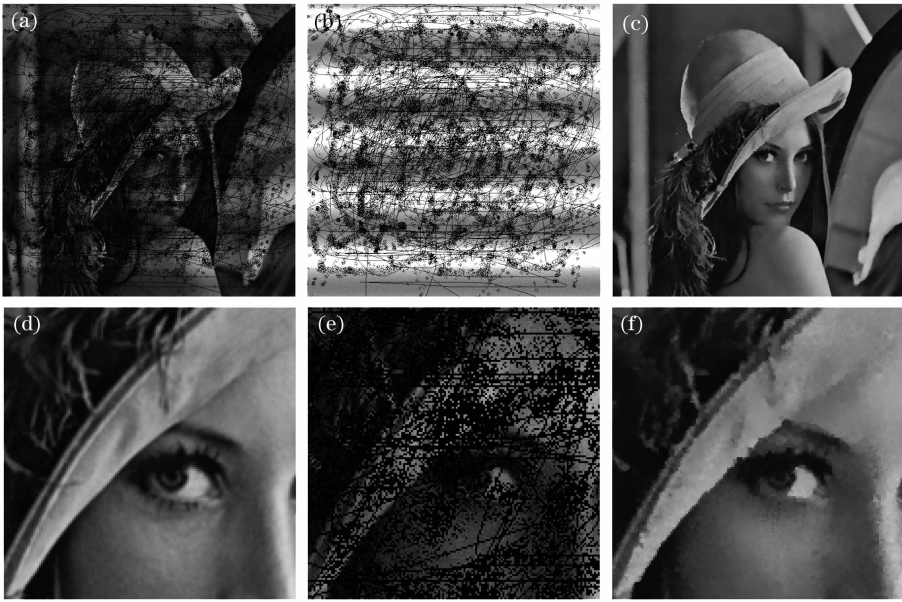


图 8 合成图像处理结果(第二组)

Fig. 8 Synthetic image results of the proposed method (group two)

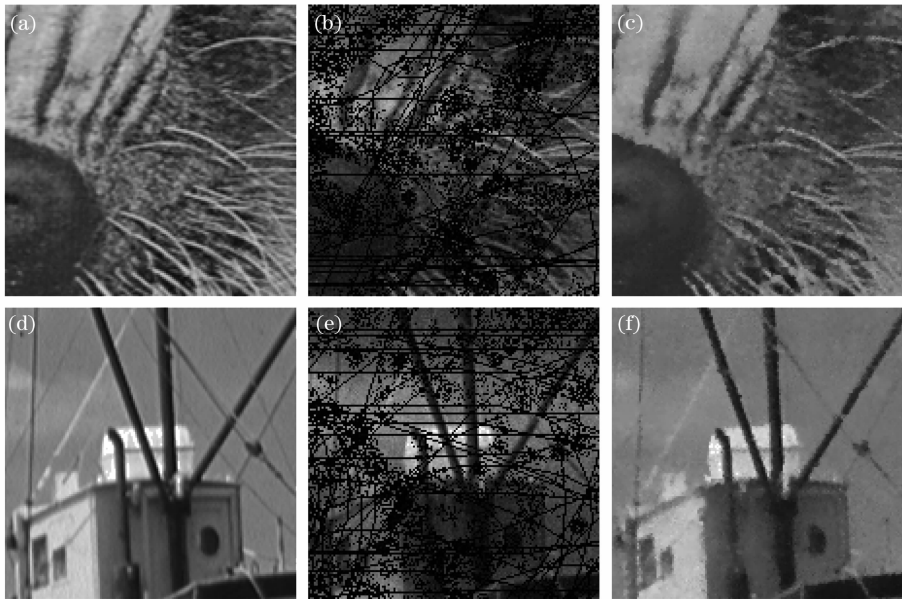


图 9 合成图像处理结果局部图(第二组)

Fig. 9 Local area of synthetic image results of the proposed method (group two)

的系统模型。针对前 3 种降质原因,假设在一次实验中污点的分布和光源的不均匀性没有发生变化,利用输入为全白时系统的输出作为先验信息,对输出的图像信息进行去噪和修复。通过理论分析和实验验证,在合适的参数选择条件下,能够在保留图像细节的同时有效地去除污点和改善图像质量,主观视觉质量和 PSNR 值都有较大的提升。该方法计算复杂度低,对于较低噪声情况下的小尺寸污点都能够较好地修复,因此能够对数字图像采集设备 CCD 表面的污点灰尘等干扰实现实时处理,具有较

好的工程应用前景。同时该方法也不仅仅局限于 $4f$ 系统,可以适用于几乎所有的光学成像系统,只要该系统能满足两个条件:1) 系统状态在一次实验中没有发生变化;2) 能够获得全白输出图像作为系统先验信息。不足之处在于:1) 双边滤波算法本身的局限,当噪声较大时, (ξ, η) 点和 (x, y) 点可能均被噪声污染,灰度相似度 $s(\xi, \eta; x, y) = |f(x, y) - f(\xi, \eta)|$ 的稳定性出现下降。2) 随着污点尺寸变大,对污点处的灰度值估计的准确性出现下降,易造成边缘失真。

参 考 文 献

- 1 L. P. Yaroslavsky. Digital Picture Processing—An Introduction [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1985. 186~240
- 2 S. M. Smith, J. M. Brady. SUSAN—a new approach to low level image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, **23**(1):45~78
- 3 C. Tomasi, R. Manduchi. Bilateral filtering for gray and color images [C]. *Computer Vision*, Sixth International Conference, 1998. 839~846
- 4 A. Buades, B. Coll, J. M. Morel. A non-local algorithm for image denoising [C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference, 2005, **2**:60~65
- 5 A. Buades, B. Coll, J. M. Morel. Nonlocal image and movie denoising [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, **76**(2):123~139
- 6 P. Perona, J. Malik. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, **12**(7):629~639
- 7 L. Alvarez, P. L. Lions, J. M. Morel. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion. II [J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1992, **29**(3):845~866
- 8 Bai Junqi, Chen Qian. Algorithm for infrared image noise filtering based on anisotropic diffusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):866~869
白俊奇,陈 钱. 基于各向异性扩散的红外图像噪声滤波算法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5):866~869
- 9 D. L. Donoho, I. M. Johnstone. Threshold selection for wavelet shrinkage of noisy data [C]. *Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Engineering Advances: New Opportunities for Biomedical Engineers, 1994, **1**:A24~A25
- 10 D. L. Donoho. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, **41**(3):613~627
- 11 Zhang Yudong, Dai Yun, Shi Guohua *et al.*. Application of one-dimensional wavelet transformation in time domain optical coherence tomography imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7):1013~1016
张雨东,戴 云,史国华 等. 一维小波变换在时域光学相干层析成像中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7):1013~1016
- 12 J.-L. Starck, E. J. Candes, D. L. Donoho. The curvelet transform for image denoising [J]. *Image Processing, IEEE Transactions*, 2002, **11**(6):670~684
- 13 Zhang Jingjing, Fang Yonghua. Novel denoising method for remote sensing image based on contourlet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):462~466
张晶晶,方勇华. 基于 Contourlet 变换的遥感图像去噪新算法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):462~466
- 14 Xie Jun, P. A. Heng. Color image diffusion using adaptive bilateral filter [C]. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 27th Annual International Conference, Shanghai, China, 2005. 3433~3436
- 15 Zhang Buyue, J. P. Allebach. Adaptive bilateral filter for sharpness enhancement and noise removal [J]. *Image Processing, IEEE Transactions*, 2008, **17**(5):664~678
- 16 Zhang Ming, B. K. Gunturk. Multiresolution bilateral filtering for image denoising [J]. *Image Processing, IEEE Transactions*, 2008, **17**(12):2324~2333
- 17 Guannan Chen, Kuntao Yang, Rong Chen *et al.*. A gray-natural logarithm ratio bilateral filtering method for image processing [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9):648~650
- 18 M. Paris, D. Fredo. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach [C]. Graz, Austria: Springer Verlag, Heidelberg, D-69121, Germany, 2006. 568~580
- 19 R. C. Gonzalez, R. E. Woods. Digital Image Processing [M]. Second Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 256~260