

改进的非局部均值 Wiener 滤波图像复原算法研究*

包 宋 建

(重庆文理学院 电子电气工程学院, 重庆 永川 402160)

摘要: 图像复原在数字图像处理中具有十分重要的意义, 针对当前流行的图像复原算法存在复原效果不理想的特点, 提出了一种基于图像分离的改进的非局部均值滤波图像复原算法。本算法首先采用基于范数 L_0 梯度最小化复原算法完成对图像平滑部分的复原, 然后采用波原子变换来实现对图像细节部分的复原, 最后采用改进的非局部均值滤波来处理波原子变换产生的振铃效应和虚假边缘。实验结果表明本复原算法与当前流行的图像复原算法相比, 在图像复原的主客观效果上都有一定的提高。

关键词: 图像复原; 图像退化; 图像分离; 振铃效应; 实验结果

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2016)05-0108-05

在图像的采集、传输及变换过程中都可能会加入抖动和各种噪声, 这使得图像的质量被退化, 主要表现为图像模糊、失真和有噪声等。图像复原是图像退化的逆过程, 利用图像退化过程的某些先验知识来重构或恢复原有图像是图像复原处理的基本过程^[1]。因为图像复原在生产生活中具有重要的现实意义, 因此, 国内外相关研究者提出了一些经典的图像复原算法, 主要有维纳滤波复原法、约束最小二乘复原法、Lucy-Richardson 复原法和盲解卷积复原法等。这些经典复原算法存在着某些不足, 其中维纳滤波的不足表现在: 算法实现要得到的条件是半无限时间区间内的全部观察数据, 这一条件很难满足; 并且向量情况和噪声为非平稳的随机过程的情况应用都不方便, 因此, 维纳滤波在实际问题中应用不多。约束最小二乘复原法不需要知道图像和噪声的功率谱, 只需要噪声的均值和方差就可以进行图像的复原了, 但必须以获知噪声均值和方差为前提。Lucy-Richardson 算法与维纳滤波和约束最小二乘复原算法相比, 不需要事先预知噪声信息, 有更广泛的适用性, 但 Lucy-Richardson 算法极易引起噪声放大的缺点。当前, 研究者们又提出了一些流行的图像复原算法主要有: 傅里叶小波正则化去卷积算法 (ForWaRD)^[2], 在紧框架下基于稀疏优化的范数 L_0 分析 (L_0 -Abs)^[3] 和一种针对边缘保护的多变量多通道图像复原快速算法 (FTVd)^[4] 等。这些流行的图像复原算法与经典的图像复原算法相比, 在图像的复原的主客观效果上都取得了很大提高, 但是本文提出的基于图像分离的改进的非局部均值滤波图像复原算法与这些流行的图像复原算法在图像复原的主客观效果上有了进一步的提高。

1 图像退化原因及模型

图像的退化原因主要有光学系统的像差和衍射、成像传感器和摄影胶片的非线性、大气湍流的扰动、图像的运动等都能导致图像质量的退化; 噪声干扰可以由电子成像系统传感器、信号传输过程或者胶片颗粒性造成^[5]。根据这些依据可以建立图像的退化模型, 电路如图 1 所示, 原始图像 $f(x, y)$ 经过线性时不变系统 LTI 会得到运动模糊图像, 然后再经加性噪声 $n(x, y)$, 得到退化图像 $g(x, y)$ 。退化图像的数学模型表示如(1)式所示:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

其中, $f(x, y)$ 表示原图像, $n(x, y)$ 为加性噪声, $h(x, y)$ 为系统的点扩

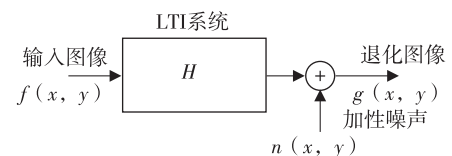


图 1 图像的线性退化模型

Fig. 1 Linear regression model of image

* 收稿日期: 2015-05-13 修回日期: 2016-04-01 网络出版时间: 2016-07-13 14:00

资助项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (No. KJ131208); 重庆市永川区科技计划项目 (No. Ycstc2014ac3001)

作者简介: 包宋建, 男, 讲师, 研究方向为视频编码与嵌入式技术, E-mail: bsj126@126.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20160713.1400.012.html>

散函数, $g(x, y)$ 为退化图像。

图像复原就是从退化图像中提取所需要的有用信息, 根据图像退化模型的逆过程, 并找出退化的原因、机理和过程等先验知识, 恢复出图像的本面目。

2 基于图像分离的改进的非局部均值滤波图像复原算法

基于图像分离的复原算法是将退化图像分为细节图像和平滑图像两个部分, 对这两个部分采用不同的复原算法, 算法流程如图 2 所示。首先, 对退化图像进行基于 L_0 梯度最小化的图像复原, 得到初始复原图像, 同时得到退化图像与初始复原图像之差的残差图像, 该算法对图像的轮廓和边缘信息捕获效果好, 可以得到较好的平滑效果; 其次, 对残差图像进行基于波原子域的 Wiener 滤波图像复原算法, 波原子变换是一种半尺度半方向变换, 它能够更稀疏地表示图像的纹理特征。最后, 对由于波原子变换导致的复原图像的振铃效应和虚假边缘信息进行消除而采用改进的非局部均值滤波算法。

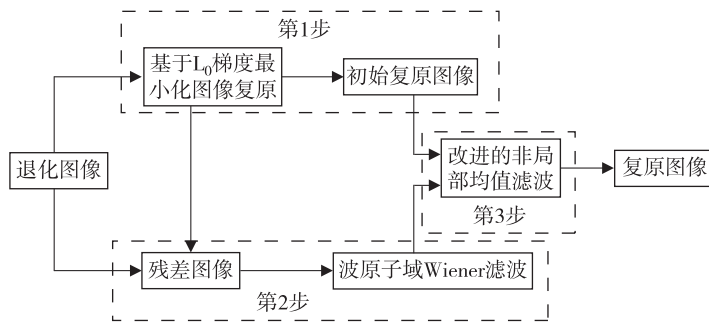


图 2 图像分离的图像复原算法框图

Fig. 2 Image segmentation restoration algorithm block diagram

下面对基于图像分离的改进的非局部均值滤波图像复原算法分为 3 步介绍。第 1 步, 基于范数 L_0 梯度最小化图像复原算法介绍; 第 2 步, 基于波原子域的 Wiener 滤波图像复原算法介绍; 第 3 步, 改进的非局部均值滤波算法介绍。

1) 范数 L_0 梯度最小化图像复原算法。针对图像的平滑部分, 本文提出了基于范数 L_0 梯度最小化复原算法, 该算法对平滑部分的复原效果好, 并对图像的边缘和轮廓有较好的保持作用。对于图像中每一像素 p , 梯度 ∇u_p 表示沿着 x 和 y 方向邻近像素的差分, 即表示为:

$$\nabla u_p = (\partial_x u_p, \partial_y u_p)^T, \tag{2}$$

这里, $p = (n_1, n_2)$ 。 L_0 梯度的度量表示如下:

$$count(u) = \# \{ p \mid |\partial_x u_p| + |\partial_y u_p| \neq 0 \}, \tag{3}$$

$$\min_u \left\{ \sum_p (f_p - (u * h)_p)^2 + \lambda \cdot count(u) \right\}, \tag{4}$$

其中, $count(u)$ 是梯度 ∇u_p 不为 0 的像素的个数。解以上(4)式可以得到原始图像的初始估计。为了保持并增强图像的主要轮廓以及使问题处理的简易性, 在此做近似求解。根据 $\partial_x u_p$ 引入 s_p 和根据 $\partial_y u_p$ 引入 v_p , 并设定 $\partial_x u = s, \partial_y u = v$, 则(4)式可以写成无约束优化问题如(5)式所示。

$$\min_{u, h, v} \sum_p \{ (f_p - (u * h)_p)^2 + \beta (\partial_x u_p - s_p)^2 + \beta (\partial_y u_p - v_p)^2 \} + \lambda count(s, v), \tag{5}$$

其中, $count(s, v) = \# \{ p \mid |s_p| + |v_p| \neq 0 \}$, β 是自适应参数。对(5)式的求解采用分别最小化 u 和最小化 (s, v) 来求解。

a) 求解 u 。将(5)式中不包含 u 的项去掉, 得到最小化式子(6), 求解(6)式得到 u 估计。

$$\{ (f_p - u * h)^2 + \beta (a_1 * u - s)^2 + \beta (a_2 * u - v)^2 \}. \tag{6}$$

对(6)式的空域求解很困难, 对其进行傅氏变换, 得到如下形式:

$$\{ (F_p - UH)^2 + \beta (A_1 U - S)^2 + \beta (A_2 U - V)^2 \}, \tag{7}$$

这样对(7)式的求解可直接得到为:

$$U = \frac{\overline{HF}_p + \beta \overline{A_1} S + \beta \overline{A_2} V}{\overline{HH} + \beta \overline{A_1} A_1 + \beta \overline{A_2} A_2}, \tag{8}$$

其中, $\overline{A_1}, \overline{A_2}$ 和 \overline{H} 分别是 A_1, A_2 和 H 的复共轭。

b) 求解 (s, v) 。求解 (s, v) 的目标函数如下所示:

$$\min_{s, v} \sum_p \{ (\partial_x u_p - s_p)^2 + (\partial_y u_p - v_p)^2 \} + \frac{\lambda}{\beta} count(s, v). \tag{9}$$

根据文献[6]提出的方法可以直接求出(9)式的解,得到(10)式

$$(s_p, v_p) = \begin{cases} (0, 0), & \text{当 } (\partial_x u_p)^2 + (\partial_y u_p)^2 \leq \lambda/\beta \text{ 时,} \\ (\partial_x u_p, \partial_y u_p), & \text{其他情况。} \end{cases} \quad (10)$$

2) 波原子域的 Wiener 滤波复原算法。通过第 1 步的复原算法,复原出了图像的主要轮廓和边缘,即得到了初始复原图像 u_1 ,但图像的一些细节信息被丢失掉了,针对此进行第 2 步复原算法,即波原子域的维纳滤波来复原丢失了的细节信息,其具体算法步骤为:

a) 首先得到图像的残差并进行 Fourier 正则化处理(FoRD)。图像残差 $\Delta u(n_1, n_2)$ 定义为退化图像 $u(n_1, n_2)$ 与初始复原图像 $u_1(n_1, n_2)$ 之差,如(11)式所示。

$$\Delta u(n_1, n_2) = u(n_1, n_2) - u_1(n_1, n_2). \quad (11)$$

对图像残差 $\Delta u(n_1, n_2)$ 进行 FoRD 处理得到:

$$\Delta U(k_1, k_2) = \Delta F_p(k_1, k_2) H(k_1, k_2) = \Delta U \frac{|H(k_1, k_2)|^2}{|H(k_1, k_2)|^2 + \alpha} + \Gamma(k_1, k_2) H(k_1, k_2), \quad (12)$$

其中, ΔU 是图像残差的离散傅里叶形式, ΓH 是遗漏噪声的离散傅里叶形式。

b) 其次进行波原子域的 Wiener 滤波。对残差图像进行傅里叶正则化后,噪声得到了大量减少,如果再通过波原子域的 Wiener 滤波,则可以消除其中的遗漏噪声。通过以下式子来计算波原子系数:

$$\widetilde{\omega \Delta u_{a,\mu}} = \omega \Delta u_{a,\mu} \frac{|\omega \Delta u_{a,\mu}^e|^2}{|\omega \Delta u_{a,\mu}^e|^2 + \beta \sigma_{a,\mu}^2}. \quad (13)$$

其中, $\omega \Delta u_{a,\mu}^e$ 是另一个去噪图像的波原子系数,此处利用硬阈值函数 $TH(\omega \Delta u_{a,\mu,c}) = \begin{cases} \omega \Delta u_{a,\mu}, & \text{当 } |\omega \Delta u_{a,\mu}| > c \sigma_{a,\mu}^2 \text{ 时} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$, 收缩 $\omega \Delta u_{a,\mu}$ 得到估计图像的波原子系数 $\omega \Delta u_{a,\mu}^e$ [7]。

3) 改进的非局部均值 Wiener 滤波。使用波原子域的 Wiener 滤波进行图像复原时,虽然可以减小噪声,但是波原子系数的伸缩会引起振铃效应,产生虚假边缘,从而复原图像失真[8]。为此,采用改进的非局部均值滤波即能够减少振铃效应又能够保持图像的细节。

通过算法的第 1 步和第 2 步可以得到初始复原图像 u_1 和残差图像 Δu_a^w ,把这两部分直接相加得到复原图像:

$$\tilde{u}(n_1, n_2) = u_1(n_1, n_2) + \Delta u_a^w(n_1, n_2), \quad (14)$$

其中 $(n_1, n_2) \in \Omega$, 利用空间域的图像相邻块间相素点的相似性实现纹理的保持,改进的非局部均值滤波得到最终的图像复原结果为:

$$u_{\text{final}}(i, j) = \frac{\sum_{(t,l) \in \Omega_B(i,j)} Q}{\sum_{(t,l) \in \Omega_B(i,j)} W}, \quad (15)$$

其中, $Q = \exp\left(-\frac{\|\tilde{u}(N_{i,j}) - \tilde{u}(N_{t,l})\|_{2,a}^2}{\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{\|N_{i,j} - N_{t,l}\|_{2,a}^2}{\sigma_s^2}\right) \tilde{u}(t, l)$, $W = \exp\left(-\frac{\|\tilde{u}(N_{i,j}) - \tilde{u}(N_{t,l})\|_{2,a}^2}{\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\|N_{i,j} - N_{t,l}\|_{2,a}^2}{\sigma_s^2}\right)$, 其中 $\Omega_B(i, j)$ 表示以 (i, j) 为中心, 窗口大小为 $(2B+1)^2$ 的集合。 $\tilde{u}(N_{i,j})$ 表示以像素点 $p(i, j)$ 为中心, 大小为 $(2L+1)^2$ 的图像块。 $\omega_y = \exp\left(-\frac{\|\tilde{u}(N_{i,j}) - \tilde{u}(N_{t,l})\|_{2,a}^2}{\sigma_y^2}\right)$ 代表空间权重, $\omega_s = \exp\left(-\frac{\|N_{i,j} - N_{t,l}\|_{2,a}^2}{\sigma_s^2}\right)$ 代表强度权重。在(15)式中,

$$\|\tilde{u}(N_{i,j}) - \tilde{u}(N_{t,l})\|_{2,a}^2 = \sum_{m=-L}^L \sum_{n=-L}^L G_a(m, n) (\tilde{u}(N_{i,j})(m, n) - \tilde{u}(N_{t,l})(m, n))^2, \quad (16)$$

$$\|N_{i,j} - N_{t,l}\|_{2,a}^2 = \sum_{m=-L}^L \sum_{n=-L}^L G_a(m, n) (N_{i,j}(m, n) - N_{t,l}(m, n))^2, \quad (17)$$

其中, G_a 是标准差为 α 的高斯核函数。 $\|\tilde{u}(N_{i,j}) - \tilde{u}(N_{t,l})\|_{2,a}^2$ 是两个大小相同的像素邻域 $N_{i,j}$ 和 $N_{t,l}$ 间的加权欧几里距离[9]。

为了得到更好的复原效果,可以将以上介绍的 1), 2), 3) 这 3 步进行循环,即将第 3 步的输出作为第 1 步的输入,如此反复 3~4 次,就会得到效果更好的复原图像。

3 实验

1) 图像复原效果客观评价指标 ISNR。为了对图像的复原效果进行客观评价,笔者采用改进的峰值信噪比 (ISNR)这一指标来进行衡量。

$$ISNR = 10 \lg \frac{\sum_{i,j} [g(i,j) - f(i,j)]^2}{\sum_{i,j} [\hat{f}(i,j) - f(i,j)]^2}, \quad (18)$$

其中, $g(i,j)$ 为退化图像, $f(i,j)$ 为原始图像, $\hat{f}(i,j)$ 为复原图像, $\sum_{i,j}$ 表示对整个图像求和。ISNR 值越大,说明图像的复原效果就越好。

2) 本文提出算法与当前流行复原算法性能比较实验。将提出的算法与当前比较流行的图像复原算法 ForWaRD, L_0 -AbS 和 FTVd 进行比较,根据文献[2-4]提出的算法在 Matlab 下编程对算法进行实现。所有数值运算在 Windows 7 平台下, Matlab R2012b 上实现。计算机为 Intel(R) Pentium(R) Dual CUP E2220 2.40 GHz 的台式机。选取以下 4 种点扩散函数为例,并加以抖动,比较几种算法的复原性能。

$PSF_1: h(x,y) = fspecial('gaussian',[21,28],10);$

$PSF_2: h(x,y) = fspecial('motion',71,56);$

$PSF_3: h(x,y) = fspecial('disk',15);$

$PSF_4: h(x,y) = fspecial('log',[5,5],0.5);$

下面以 Cameraman.tif 和 Tire.tif 为测试对象,仅在 PSF_1 与 PSF_2 退化下进行复原实验,实验结果如图 3 和图 4 所示。

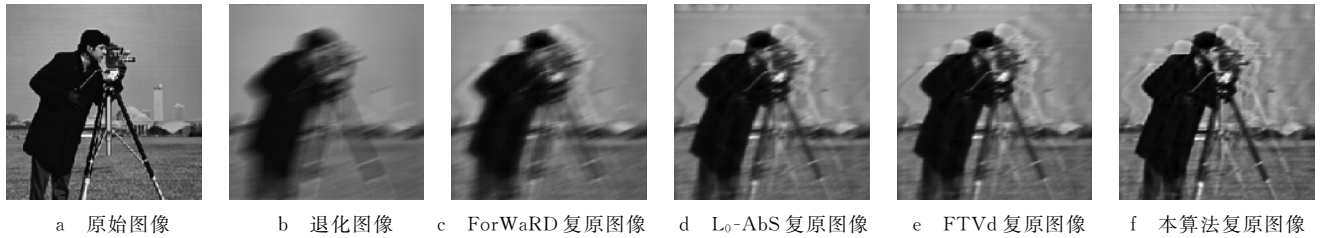


图 3 Cameraman 在 PSF_1 退化后的各算法复原实验

Fig. 3 Restoration experiment of cameraman after PSF_1 degradation

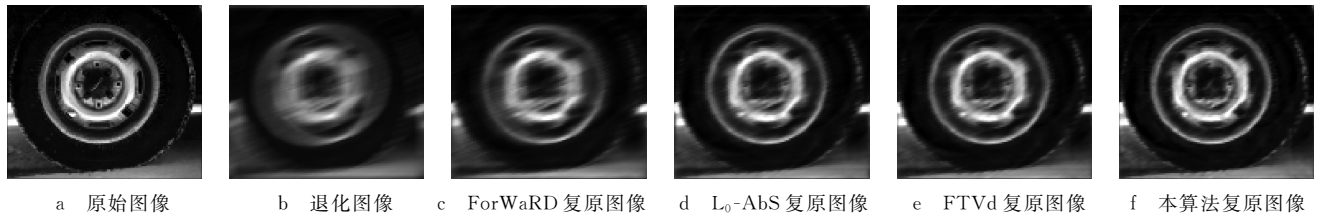


图 4 Tire 在 PSF_2 退化后的各算法复原实验

Fig. 4 Restoration experiment of tire after PSF_2 degradation

以 Cameraman.tif 和 Tire.tif 为测试对象,在 PSF_1, PSF_2, PSF_3 和 PSF_4 退化并加抖动复原后在 Matlab 下编程测得 4 种算法的 ISNR 值。实验结果如表 1、表 2 所示。

表 1 “Cameraman”图像复原结果的 ISNR 值比较

Tab. 1 Comparison of cameraman image

	restoration results ISNR values				dB
方法	本文算法	ForWaRD	L_0 -AbS	FTVd	
实验 1(PSF_1)	3.06	1.89	2.34	2.56	
实验 2(PSF_2)	5.23	3.56	3.77	3.31	
实验 3(PSF_3)	4.01	4.02	3.45	3.65	
实验 4(PSF_4)	5.14	4.89	5.23	3.89	

表 2 “Tire”图像复原结果的 ISNR 值比较

Tab. 2 Comparison of tire image restoration

	results ISNR values				dB
方法	本文算法	ForWaRD	L_0 -AbS	FTVd	
实验 1(PSF_1)	5.02	4.08	4.78	4.85	
实验 2(PSF_2)	4.07	3.25	3.37	4.01	
实验 3(PSF_3)	6.43	6.11	6.02	6.32	
实验 4(PSF_4)	5.63	5.19	5.72	5.33	

4 结果分析与结论

通过图 3 和图 4 比较可见,以 Cameraman 和 Tire 为测试对象的 4 种复原算法中,本文提出的复原算法在主观复原效果上都要优于 ForWaRD, L_0 -Abs 和 FTVd 算法,复原图像的轮廓和细节更加清晰并接近原图像。通过对 Cameraman 和 Tire 图像复原结果的 ISNR 值比较,见表 1 和表 2 所示,本文提出的复原算法的 ISNR 值大多数情况下均明显高于 ForWaRD, L_0 -Abs 和 FTVd 算法的 ISNR 值,所以本文提出的复原算法客观上要优于其他 3 种复原算法。通过对实验结果分析可得,基于图像分离的改进的非局部均值滤波图像复原算法与当前流行的复原算法相比较,其在图像复原的主客观效果上都有一定的提高。

参考文献:

- [1] 吴娜,郭景富,谷德山.一种基于遗传算法的图像恢复[J]. 信息技术,2013,27(1):28-30.
Wu N, Guo J F, Gu D S. Genetic algorithm applied to image restoration[J]. Information Technology, 2013, 27(1): 28-30.
- [2] Neelamani R, Choi H, Baraniuk R G. Forward; fourier-wavelet regularized deconvolution for ill-conditioned systems[J]. IEEE Trans Signal Process, 2004, 52: 418-433.
- [3] Portilla J. Image restoration through L_0 analysis-based sparse optimization in tight frames [J]. Proc 16th IEEE ICIP, 2009: 3909-3912.
- [4] Yang J, Yin W, Zhang Y, et al. A fast algorithm for edge-preserving variational multichannel image restoration[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2): 569-592.
- [5] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital image processing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003.
- [6] Li X, Lu C W, Yi X, et al. Image smoothing via L_0 gradient minimization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): 174-177.
- [7] 郭中华,李树庆,王磊,等.自适应阈值的小波去噪改进算法研究[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2015,27(6): 740-744.
Guo Z H, Li S Q, Wang L, et al. Improved algorithm with auto-adaptive threshold for wavelet image denoising [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2015, 27(6): 740-744.
- [8] 郑良缘,王平,高颖慧.基于超像素分割的图像去雾算法[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2015,29(6): 100-106.
Zheng L Y, Wang P, Gao Y H. Single image dehazing based on super pixel segmentation [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2015(6): 100-106.
- [9] Achanta R, Shaji A. SLIC super-pixels compared to state-of-the-art super-pixel methods [J]. IEEE Transactions on PAMI, 2012, 34(11): 2274-2282.

Image Restoration Algorithm Research Based on Improved Non-local Average Wiener Filtering

BAO Songjian

(College of Electronic and Electrical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Yongchuan Chongqing 402160, China)

Abstract: The image restoration is of great significance in digital image processing. In view of the current popular image restoration algorithm has the features of recovery effect poorer; this paper proposes a restoration algorithm based on image separation. This algorithm firstly adopts the gradient minimum restoration algorithm to complete recovery of the image smooth partial based on norm L_0 , then uses the wave atoms transformation to achieve recovery of the image details, and finally adopts the improved non-local average filter to process the ringing effect and false edge produced by wave atoms transformation. The experimental results show that the restoration algorithm based on image separation comparing with the current popular image restoration algorithm, the subjective and objective effect of the image restoration can be significantly improved.

Key words: image restoration; image degradation; image separation; ringing effect; experimental results

(责任编辑 游中胜)