

灰度极值加权求和图像振铃效应评价算法

柯 铭¹, 张天明¹, 秦爱景², 王 波², 白 旭²

(1. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 在图像盲复原过程中, 对模糊核的过估计会产生误差, 导致图像振铃效应; 现有算法无法对振铃的严重程度进行有效评估, 针对这个问题, 提出一种振铃效应的评价方法。从振铃效应产生的物理机理出发, 分析图像盲复原所致振铃效应的原因和对图像质量的影响; 通过提取振铃图像过冲与涟波区域, 并对该区域梯度值进行加权统计, 量化表征振铃效应的严重程度。实验结果表明, 当模糊核参数 σ 值超过 3 时, 算法的结果曲线随着参数增大呈单调递增状态, SSIM 评价结果变化幅度趋于零。算法可以有效地评价不同复原算法和不同复原参数下的复原图像中的振铃效应。

关键词: 振铃; 盲复原; 质量评价; 灰度极值加权求和算法

DOI: 10.15938/j.jhust.2019.05.016

中图分类号: TP751 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2019)05-0093-08

Gray Extreme Weighted Sum Image Ringing Evaluation Algorithm

KE Ming¹, ZHANG Tian-ming¹, QIN Ai-jing², WANG Bo², BAI Xu²

(1. School of Computer and Communication Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Measurement-control Technology and Communications Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In the process of image blind restoration, the estimation of the fuzzy kernel usually produces errors which lead to image ringing. The existing algorithm cannot effectively evaluate the severity of ringing. To solve this problem, a method for evaluating the ringing effect is proposed. From the physical mechanism of image ringing effect caused by blind restoration of image, the causes of the ringing effect caused by blind restoration of images and the influence on image quality are analyzed. By extracting the overshoot and ripple regions of the ringing image and weighting the gradient values of the region, the severity of the ringing effect is quantified. The experimental results show that when the fuzzy kernel parameter value exceeds 3, the algorithm shows a monotonically increasing state with increasing parameters, The change in SSIM evaluation results tends to be zero. This algorithm can effectively evaluate different restoration algorithms and different restoration parameters. Restore the ringing effect in the image under different restoration parameters.

Keywords: ringing; BIR; quality; gray-scale extreme value weighted sum algorithm

收稿日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(61263047)。

作者简介: 柯 铭(1978—), 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师;

张天明(1995—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 王 波(1992—), 男, 硕士研究生, E-mail: lindaleg9@126.com.

0 引言

在光学成像过程中由于光学系统缺陷、大气湍流、目标物体快速运动等因素导致了图像退化现象,表现为图像对比度及清晰度降低,纹理边缘区域平滑化等。图像模糊制约了图像真实信息的获取,影响着图像在工程实践中的应用价值。针对这一问题,各种图像复原算法应运而生,如维纳滤波、全变分、约束最小二乘滤波复原、L-R 等等^[1-3]。

复原算法需要图像模糊核函数作为输入,但实际系统工作状况复杂,模糊核函数难以直接获得,通常需要根据图像情况估计核函数并进行盲复原,因而核函数的估计误差直接影响着最终的复原。当估计误差较大时复原图像中可能产生振铃效应,表现为图像强边缘处周期性的波纹,进而致使复原效果严重降低。

为表征振铃效应对图像质量的影响,国外相关研究中,M. Balasubramanian 等通过迭代卷积算法评估图像质量的振铃度量^[4]; M. Anto Bennet 等使用广义最小二乘算法对振铃效应的性能进行分析^[5]; Ali Mosleh 等使用图像解卷积检测振铃伪影^[6];而国内的相关研究中,左博新提出一种盲复原图像振铃效应的评价算法^[7],该算法使用 Gabor 滤波器,共生向量等方法对振铃效应进行评价,该算法对图像边界振铃效应评价效果较好。

本文针对图像盲复原造成的图像振铃问题,分析盲复原算法中模糊核估计误差与振铃效应严重程度的关系,在此基础上提出振铃效应的评价算法,并基于仿真实验对评价方法进行验证,从而对图像盲复原算法设计及应用提供优化建议。

1 振铃机理及其对图像质量的影响分析

1.1 振铃机理

当阶跃信号通过低通滤波器时会产生周期性的震荡失真,对于图像信号则表现为在图像边缘附近出现环带或像是“鬼影”的环状伪影,原本的边缘响应信号会首先形成过冲,然后跳到稳态之下而产生第一个涟波,然后在稳态附近来回震荡,过冲和后面连续出现的涟波统称为振铃效应。其本质是空域-频域转换中产生的吉布斯效应^[8]。

当利用傅里叶级数^[9]表示阶跃函数时,会在阶

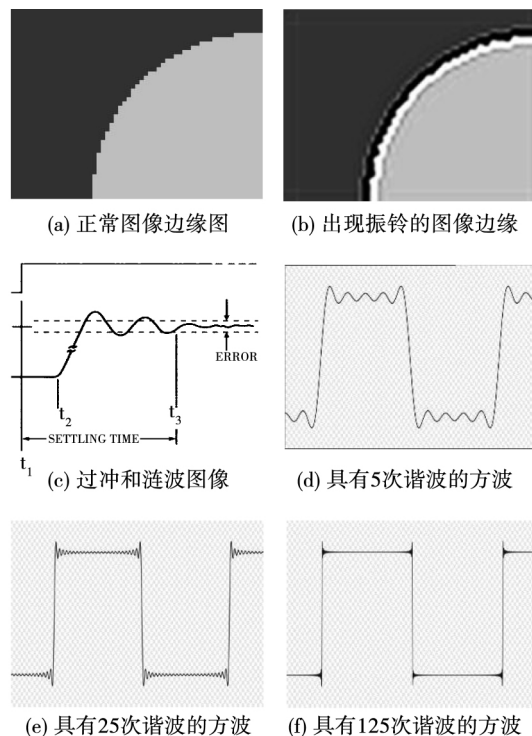


图1 振铃表现和不同谐波的正方波图

Fig. 1 Ringing performance and several square wave curve

跃处出现过冲,并且该过冲不会随着傅里叶级数的增加而消失。图1(d),图1(e),图1(f)展示出了不同谐波(高度为 $\pi/4$)加和的正方波,在跳跃不连续处均出现了过冲和涟波,其傅里叶展开为

$$\sin(x) + \sin(3x) + \sin(5x) + \dots \quad (1)$$

$$f = \begin{cases} \pi/4 & 2n\pi \leq \omega \leq (2n+1)\pi & n \in N^+ \\ -\pi/4 & (2n+1)\pi \leq \omega \leq (2n+2)\pi & n \in N^+ \end{cases} \quad (2)$$

该方波在 π 的每个整数倍处具有高度 $\pi/2$ 的跳跃。可以看出,随着项数的增加,近似的误差在宽度和能量上减小,但仍收敛到的固定高度。下式给出了计算误差高度极限的显式公式,可以看出傅里叶级数和超过了方波的高度,其倍数为:

$$k = \frac{1}{2} \int_0^\pi \frac{\sin t}{t} dt - \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2} * (0.089489872236 \dots) \quad (3)$$

同时可以看出,在方波的另一端将以相同的能量下冲。

1.2 图像盲复原所致振铃效应

如图2所示,图像的退化过程在数学上可表示为:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y) \quad (4)$$

式中 $g(x, y)$ 退化图像, $f(x, y)$ 为原始图像,

$h(x, y)$ 是模糊核, 即点扩散函数, $n(x, y)$ 是加性噪声。图像盲复原是通过估计 $h(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 来近似求解 $f(x, y)$ 的过程^[12]。

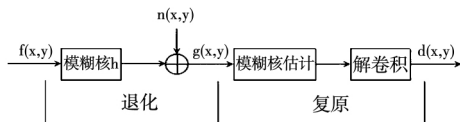


图2 图像降质及复原过程

Fig. 2 Image degradation and restoration process

考虑到空域反卷积的巨大运算量, 通常需要将图像信号利用快速傅里叶变换转换到频域以求解公式(4)。其核心问题即为在频域进行滤波:

$$I(x, y) = F^{-1} \left(\frac{G(u, v)}{H(u, v)} \right) \quad (5)$$

式中 $I(x, y)$ 为 $f(x, y)$ 在频域下的近似解, $G(u, v)$ 是退化图像 $g(x, y)$ 的频域表示, $\hat{H}(u, v)$ 是 OTF 的估计值, 即所估计模糊核的频域表示:

$$\hat{H}(u, v) = H(u, v) + \Delta H(u, v) \quad (6)$$

其中 $H(u, v)$ 为实际退化过程的 OTF, $\Delta H(u, v)$ 为模糊核的估计误差。由于 H 的病态性, 即使存在很小的扰动也会对严重影响 $I(x, y)$ 的求解, 而从式(4)和(6)可以看出, 存在的扰动主要包括噪声 $n(x, y)$ 和估计误差 $\Delta H(u, v)$ 。

成像过程中的噪声 $n(x, y)$ 多为高斯白噪声, 在空域主要体现为图像中的灰度突变, 在频域上均匀分布。与此相对, 自然图像的绝大部分能量集中在低频区域。因此目前较为常用的方法是在求解算法中构造正则化项, 利用二者在频域分布上的差别, 通过抑制复原图像中的高频信息来抑制噪声。

估计误差 $\Delta H(u, v)$ 则影响着复原图像的效果。当对模糊核的弥散程度估计不足时, 复原图像中会存在欠恢复, 图像模糊去除不完全; 而当对弥散程度估计过度时, 复原图像中会存在过恢复, 在复原图像信息的同时会放大噪声等非图像信息。由前文的分析可知, 在利用傅里叶变换进行空域-频域转换的过程中会不可避免地产生振铃现象, 并且高频信息损失越严重, 振铃现象越为明显。此外, 由于振铃与图像边缘相关, 其灰度分布与图像信息相似, 而算法中的正则化项大多针对噪声特性设计, 因此难以对振铃起到抑制作用。

综上, 当盲复原过程中对模糊核估计存在偏差, 致使复原图像存在过恢复时, 一方面, 空域-频域转换过程中固有的振铃现象会因此放大; 另一方面, 由于振铃的灰度分布与图像信息相关, 正则化项对其

约束较小, 而为了避免噪声放大, 需要调整正则化项, 进一步抑制复原图像中的高频信息, 致使振铃现象更加明显。

图3展示了复原所使用的模糊核函数与真实模糊核函数存在偏差时的复原结果。其中, 图3(a)为原始图像, 图3(b)是在图3(a)中加入高斯参数 $\sigma = 1$ 的模糊后得到的降质图像, 图3(c)是对 psf 弥散程度的估计低于实际情况 ($\sigma = 0.5$) 的复原结果, 图3(d)是对模糊核参数 psf 弥散程度的估计高于实际情况 ($\sigma = 10$) 的复原结果。从图中可以看到, 图3(c)中存在欠恢复, 图像模糊去除不完全; 而图3(d)中存在过恢复, 体现为明显的振铃。



图3 图像复原及复原图像

Fig. 3 Image restoration and restoration image

2 振铃评价指标和方法

从振铃的形成机理可知, 常规的图像特征并不能对振铃特征提取提供有效支持。下面对振铃的图像特征进行进一步分析。

2.1 振铃评价的基本思想

由于振铃主要集中在图像边缘, 所以获取振铃特征首先要得到图像边缘特征信息。图4为图像盲复原所致的振铃图像及其边缘响应曲线。在边缘响应曲线图中, 横坐标 Q_2 到 Q_2' 表示图4(a)的边缘沿着梯度方向统计的像素灰度, 横坐标 Q_2 到 Q_1 对应图4(a)右侧白色的边缘, Q_1 到 Q_2' 对应图4(a)左侧

黑色的边缘,而 L_4 表示图像灰度剧烈变化地带,对应图 4(a) 中的黑白交界区。可以看到, L_3 处波形发生灰度剧烈变化,表现呈波浪递减,并且越靠近 L_4 振荡越严重,离 L_4 越远波浪振荡越趋于平缓。

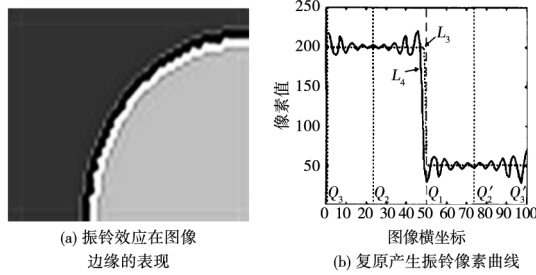


图4 振铃图像边缘表现及像素曲线图

Fig. 4 Edge representation and Pixel Curve of ringing Image

根据上述分析,为描述振铃效应,可首先提取降质图像和复原后图像的边缘区域,滤除二者的公共部分即可得到包含振铃信息的图像像素,再对该部分像素的灰度分布进行分析,找出其中的各个极值点,则振铃的强弱即可通过对各极值点处的灰度值进行加权求和定量描述。

2.2 振铃评价算法

2.2.1 算法总体流程图

图5给出了振铃灰度极值加权求和算法的具体流程图。首先提取降质图像和复原后图像的边缘区域,再通过差分去掉公共部分,剩余部分即为包含振铃信息的图像像素,其中极值代表过冲部分,其余为涟波区域,在此基础上对灰度极值进行加权求和,即可得到振铃强弱的定量描述。

2.2.2 振铃评价算法

首先使用式(7)构造高斯滤波器^[13-14],并根据式(7)分别按行和列方向分别对原始和复原后图像进行平滑,以进一步减少噪声的影响,提高结果精度:

$$\tilde{g}(x) = \frac{\exp(-x^2/2\sigma^2)}{2\pi\sigma^2} \quad (7)$$

由于振铃效应主要集中在图像的边缘部分,因此使用公式(8)和公式(9)分别对平滑后的原始图像 O 和复原后图像 R 进行边缘标记,即分别计算图像中强边缘处的梯度幅值和方向:

$$M(x, y) = \sqrt{k_x^2(x) + k_y^2(y)} \quad (8)$$

$$H(x, y) = \arctan [k_x(x, y) / k_y(x, y)] \quad (9)$$

其中 k_x 和 k_y 分别为图像沿着行和列方向的差分结果。同时将 O 和 R 边缘标记后的结果分别记为

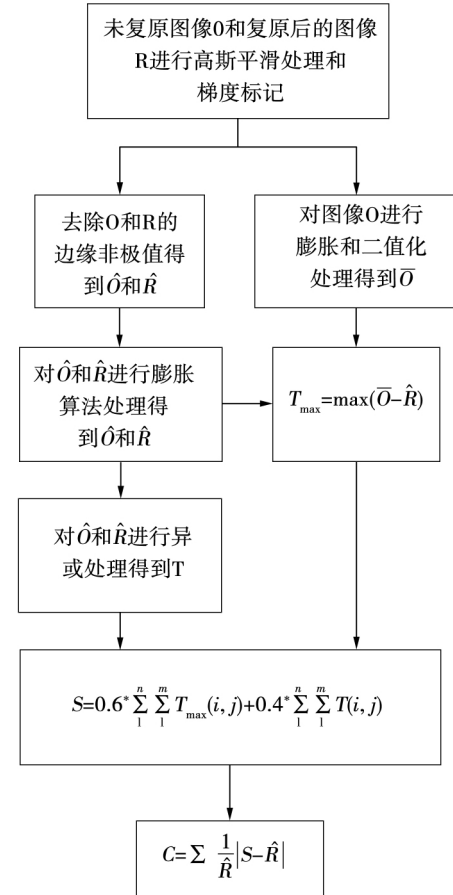


图5 算法总体流程图

Fig. 5 Overall flow chart of the algorithm

$\hat{O}$ 和 $\hat{R}$ 。利用该方法可以提取得到图像中的强边缘及其邻域内的振铃过冲与涟波,由于提取结果往往存在一定宽度,为了确定振铃区域内的梯度极值^[15],需要沿梯度方向查找强边缘及其邻域内的各个局部最大值,并采用式(10)和式(11)的线性插值方法去除梯度方向上的非极大值:

$$P_1 = \left(\frac{dx}{dy}\right) I_1(x, y) - \left(1 - \frac{dx}{dy}\right) I_2(x, y) \quad (10)$$

$$P_2 = \left(\frac{dx}{dy}\right) I_3(x, y) - \left(1 - \frac{dx}{dy}\right) I_4(x, y) \quad (11)$$

式中: $I_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3, 4$ 代表 $\hat{O}$ 和 $\hat{R}$ 中标记出的各个极值点在 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 四个方向上邻域值,同时记 $\hat{O}$ 和 $\hat{R}$ 经非极大值抑制后所取的图像为 $\bar{O}$ 和 $\bar{R}$ 。经过以上计算后 $\bar{O}$ 和 $\bar{R}$ 中包含仅梯度变化最剧烈的像素点。由于该过程提取得到的结果通常存在断点,因此利用式(12)所示的形态学膨胀算法进行补全:

$$\hat{O}(x, y) = \int_0^{n-1} \int_0^{n-1} \max(\hat{O}(i+x, j+y) + B(i, j)) dx dy \quad (12)$$

$$\hat{R}(x, y) = \int_0^{n-1} \int_0^{n-1} \max(\hat{R}(i+x, j+y) + B(i, j)) dx dy \quad (13)$$

式中 B 为结构元素。由于图像强边缘与振铃效应在图像上均表现为灰度突变^[14], 为了消除图像内容本身的影响, 将 $\hat{O}$ 和平滑后的复原图像的边缘提取结果进行逻辑异或运算去除振铃图像中的非振铃部分, 得到只包含振铃区域的梯度图像 $T(x, y)$:

$$T(x, y) = \hat{O}(x, y) \odot R(x, y) \quad (14)$$

式中: $\odot$ 代表逻辑异或运算。由图 5(a) 中可以看到, 振铃在图像中越靠近图像边缘处越明显, 而图 5(b) 中边缘也相应呈现出震荡递减状态, 所以体现振铃严重程度的因素既包括振铃波及的范围, 也包括振铃区域的灰度震荡幅度, 因此在以上提取结果的基础上, 需要同时提取振铃区域的最大过冲幅值。

对由式(8)(9)得到的边缘标记结果 $\hat{O}$ 进行膨胀运算, 使膨胀后的区域范围涵盖振铃区域, 并将该图像二值化^[17], 从而利用该图像作为模板, 从式(13)计算得到 $\hat{R}$ 的中筛选振铃的最高幅值:

$$\hat{O}(x, y) = \text{Bin} \left[\int_0^{n-1} \int_0^{n-1} \max(\hat{O}(i+x, j+y) + B(i, j)) dx dy \right] \quad (15)$$

$$T_{\max}(i, j) = \max_{i, j} (\hat{O}(i, j) \cdot \hat{R}(i, j)) \quad (16)$$

式中: $\text{Bin}[]$ 表示二值化处理, “ $\cdot$ ”表示矩阵点乘。在此基础上, 可以通过对振铃区域梯度值和最大幅值的加权求和来描述图像振铃所导致的图像梯度变化。

$$S = 0.6 * \sum_i \sum_j T_{\max}(i, j) + 0.4 * \sum_i \sum_j T(i, j) \quad (17)$$

最后, 为了进一步表征复原图像中振铃产生的伪边缘在图像中所占比重, 利用 S 与 $\hat{R}$ 定义振铃强度的评价指标:

$$C = \sum_{n=1}^N \frac{1}{\hat{R}} |S - \hat{R}| \quad (18)$$

3 实验验证及分析

3.1 实验方案

为了算法有效性, 采取仿真实验进行验证, 实验方案流程图如图 6 所示。

首先选取图像处理领域常用的标准图像作为输入源, 对标准图像添加高斯模糊生成退化图像。同时采用通用性和代表性的四种复原算法: 维纳滤波,

总变分, 约束最小二乘方滤波复原算法, L-R 复原算法。使用四种复原算法来进行图像复原时在算法输入中加入选定的模糊核误差^[18], 以模拟盲复原过程中不同程度的估计误差所造成的影响。最后通过本文算法来评价复原图像中的振铃严重程度。

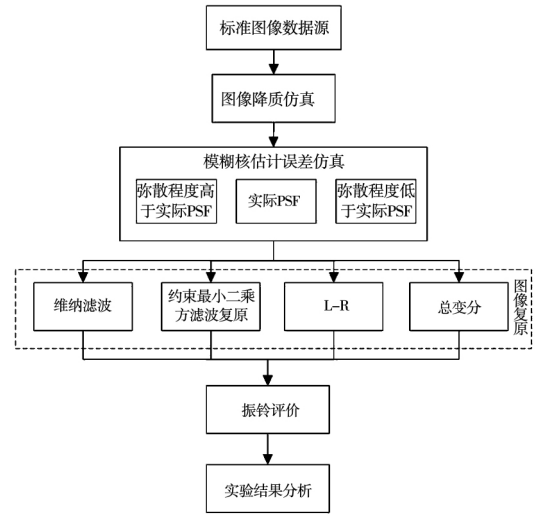


图 6 实验流程图

Fig. 6 Experimental Flow Chart

为了保证实验结果的准确性, 本文图像选自 LIVE 数据库和 TID2008 图像库, 复原算法中的维纳滤波, 约束最小二乘方滤波复原^[19], L-R 复原算法采用 MATLAB 标准库函数, 同时使用 MATLAB 标准库函数 SSIM 图像评价结果与本文算法进行对比分析。为了测试本文算法对不同图像内容的敏感度和适用性, 实验选取包含人像、静物、风景等内容, 且含有丰富的边缘及纹理信息的 15 幅图像, 部分样本图像如下所示。



图 7 实验样本图像示例

Fig. 7 An example of an experimental sample image

3.2 实验结果及分析

图 8(a) 为标准数据库中选取的样本图像, 图 8(b) 是对样本图像添加参数为 $\sigma = 0.8$ 的高斯模糊得到的降质图像^[2]。图 9 ~ 图 12 分别给出了维纳滤波、总变分、约束最小二乘方滤波复原、L-R 四种算法利用含误差 psf 进行复原的部分结果, 并给出了图像坐标为 (57, 82) 处放大 30 倍后的边缘图像。图中可以清楚的看到由于复原时 psf 所含误差的不同, 图像中均产生了不同程度的振铃。

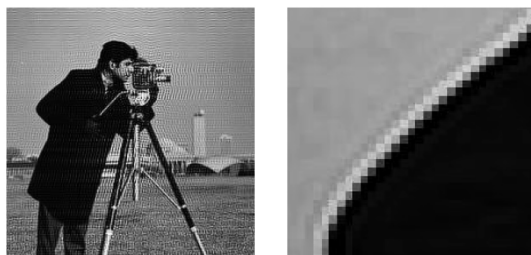


图 8 标准图和退化图

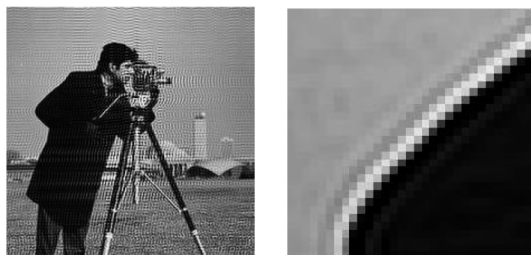
Fig. 8 Standard diagram and degeneration diagram



(a) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=1$)



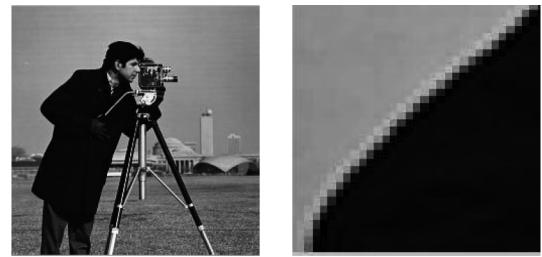
(b) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=2.5$)



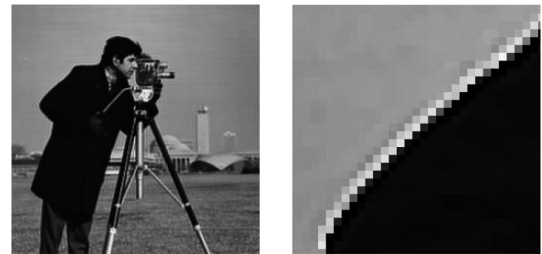
(c) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=5$)

图 9 维纳滤波复原算法处理图像

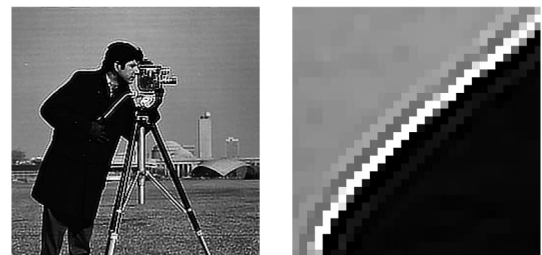
Fig. 9 Wiener filter restoration algorithm for image processing



(a) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=1$)



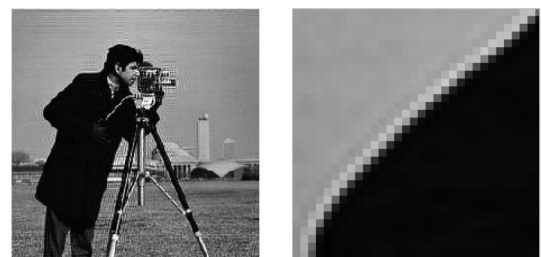
(b) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=2.5$)



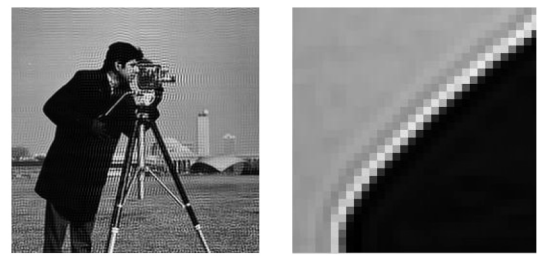
(c) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=5$)

图 10 总变分复原算法处理图像

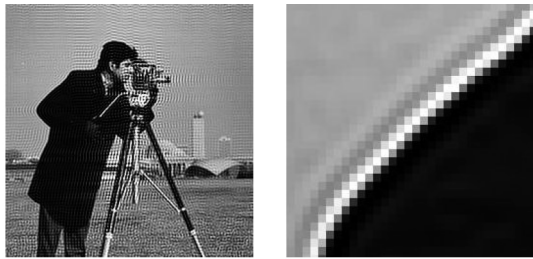
Fig. 10 Total variation restoration algorithm for image processing



(a) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=1$)

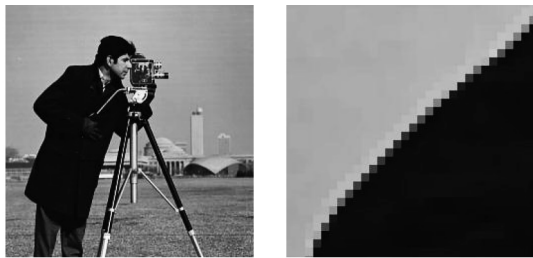


(b) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=2.5$)

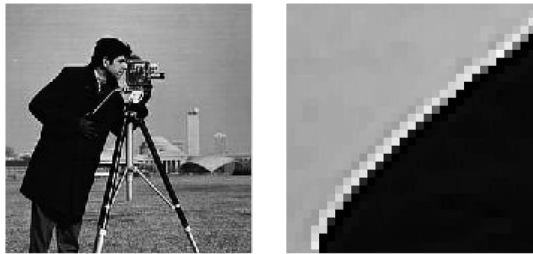


(c) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=5$)

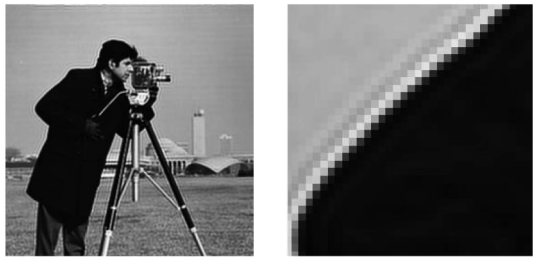
图 11 约束最小二乘方滤波复原算法处理图像
Fig. 11 Constrained least squares filtering restoration algorithm for image processing



(a) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=1$)



(b) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=2.5$)



(c) 复原图及边缘放大图 ($\sigma=5$)

图 12 L-R 算法处理图像
Fig. 12 L-RAlgorithm processing image

表 1 SSIM 评价结果曲线
Tab. 1 SSIM evaluation result curve

σ	维纳滤波	约束最小二乘	总变分
1	0. 808 2	0. 911 8	0. 874 1
1. 5	0. 631 9	0. 792 9	0. 741
2	0. 580 1	0. 750 9	0. 739 4
2. 5	0. 562 1	0. 734 2	0. 736 8
3	0. 549 7	0. 723 5	0. 725 3
3. 5	0. 543 7	0. 717 3	0. 720 1

续表 1

σ	维纳滤波	约束最小二乘	总变分
4	0. 540 1	0. 713 5	0. 714 4
4. 5	0. 537 2	0. 711 1	0. 709 6
5	0. 534 8	0. 709 5	0. 703 2
5. 5	0. 533 4	0. 708 3	0. 693 8
6	0. 532 8	0. 707 5	0. 684 1
6. 5	0. 532 7	0. 706 8	0. 673 4
7	0. 532 2	0. 706 3	0. 673 2
7. 5	0. 532	0. 705 9	0. 673
8	0. 531 7	0. 705 6	0. 673
8. 5	0. 531 5	0. 705 3	0. 673 6
9	0. 531 4	0. 705 1	0. 673 1
9. 5	0. 531 3	0. 705 2	0. 672 8
10	0. 531 2	0. 704 7	0. 6727

表 2 本文算法评价结果曲线

Tab. 2 The evaluation result curve of the algorithm in this paper

σ	维纳滤波	约束最小二乘	L-R	总变分
1	0. 118 3	0. 102 4	0. 068 9	0. 103 7
1. 5	0. 127 7	0. 119 9	0. 073 3	0. 116 3
2	0. 129 3	0. 120 4	0. 093 1	0. 119 1
2. 5	0. 130 4	0. 122 1	0. 098 7	0. 123 1
3	0. 138 1	0. 124 2	0. 100 4	0. 127 6
3. 5	0. 142 5	0. 127 9	0. 107 7	0. 133 1
4	0. 149 7	0. 128 5	0. 109 4	0. 139 7
4. 5	0. 155 4	0. 130 9	0. 111 2	0. 147 7
5	0. 159 7	0. 131 1	0. 116 4	0. 150 1
5. 5	0. 164 1	0. 134 1	0. 120 1	0. 158 4
6	0. 169 2	0. 137 7	0. 123 5	0. 166 3
6. 5	0. 171 4	0. 140 1	0. 125 2	0. 179 3
7	0. 176 6	0. 1476	0. 127 9	0. 186 9
7. 5	0. 179 7	0. 153 9	0. 128 9	0. 192 1
8	0. 180 1	0. 155 2	0. 130 1	0. 198 1
8. 5	0. 181 3	0. 158 7	0. 130 9	0. 214 4
9	0. 184 7	0. 1621	0. 134 9	0. 219 7
9. 5	0. 188 9	0. 163 7	0. 136 1	0. 223 1
10	0. 190 2	0. 164 9	0. 137 9	0. 231 7

图 13(a) 和图 13(b) 是分别使用 SSIM 和本文算法对四种算法复原结果的振铃评价曲线,图中横坐标为采用的 psf 参数值,纵坐标为算法评价。由图 13(a) 可见,使用 SSIM 评价振铃效应在模糊核

估计与实际值误差较小时能够准确测量,当 $\sigma > 3$ 时评价结果趋于平缓,测量结果不再变化,与主观观察结果不一致。

图 13(b) 中四条曲线随着模糊核估计误差的增大而呈上升趋势,这也与实验图像的主观观察结果一致,并且在模糊核误差变大时依旧能够准确测量。因此本文算法可以有效评价不同复原算法和不同复原参数下的复原图像中的所存在的振铃效应。同时也能够证明,在图像盲复原过程中,当对模糊核的弥散程度的估计高于实际时,复原图像中会产生振铃效应^[2],其严重程度随估计误差的增大而增强。

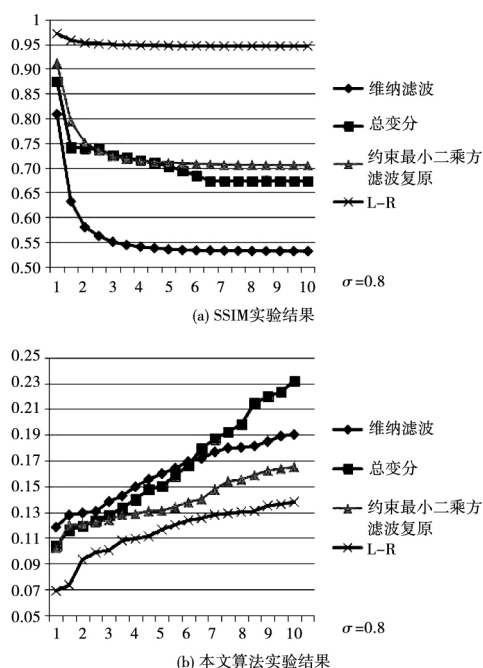


图 13 振铃评价结果

Fig. 13 Ringing evaluation results

4 结 论

本文从盲复原所致振铃效应的机理出发,通过分析振铃效应在图像中的灰度及结构特性,提出了一种基于灰度极值加权求和的图像振铃效应评价算法,并通过仿真实验方法,利用不同样本图像及复原算法对算法有效性进行了验证。实验结果表明,当模糊核误差过大($\sigma > 3$)时,SSIM对振铃的评价结果不再变化;而本文算法可以有效评价不同复原算法、不同复原参数下的复原图像中的所存在的振铃效应;此外根据本文算法的评价结果可以定量得出,而当盲复原过程中所估计模糊核的弥散程度高于实际时,复原图像中会存在过恢复,导致明显的振铃效应。

参 考 文 献:

- [1] QUAN W, ZHANG W N. "Restoration of Motion-Blurred Star Image Based on Wiener Filter" [J] // 4th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2011, 2: 691.
- [2] 钱春强, 王继成. 基于改进约束最小二乘方滤波复原算法[J]. 计算机技术与发展, 2007, 6(17): 9.
- [3] XIAO GuangLv, YONG Zhong Song, SHUN Xu, et al. Image Restoration with a High-order Total Variation Minimization Method [J]. Le. Applied Mathematical Modeling, 2013, 36(16/17): 8210.
- [4] 陈云龙, 王平, 王鹏. 基于L-R非线性迭代的降质图像复原算法[J]. 计算机工程, 2010, 2(36): 202.
- [5] 李静, 王敏, 沙杰峰. 基于小波变换的红外目标去运动模糊的研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(16): 120.
- [6] M. Balasubramanian, S. S. iyengar. A Ringing Metric to Evaluate the Quality of Images Restore Using Iterative Deconvolution Algorithm [C] // Proceeding-184 h. International Conference on Systems Engineering, 2005: 438.
- [7] M. Anto Bennet, G. Vijayalakshmi. Performance & Analysis of Blocking & Ringing Artifacts Reduction Using Generalized Least Square Algorithm [J]. Middle-East Journal of Scientific Research, 2014, 21(11): 2194.
- [8] Ali Mosleh, J. M. Pierre Langlois. Image Deconvolution Ringing Artifact Detection and Removal Via Psf Frequency Analysis [J]. Vecture Notes in Computer Science, 2014, 8692: 247.
- [9] 左博新, 明德烈, 田金文. 盲复原图像振铃效应评价[J]. 中国图像图形学报, 2010, 15(8): 1244.
- [10] 王靖, 施刚, 张磊, 等. 运动模糊图像边缘振铃效应的抑制方法[J]. 电子测量技术, 2013(5): 62.
- [11] 王凤随, 王冠凌, 翟成明. 吉布斯效应在信号处理课程教学中的仿真分析[J]. 中国现代教育装备, 2015(1): 81.
- [12] 黄金平, 张正炳. 卷积定理与傅里叶变换性质及其应用的关系探讨[J]. 长江大学学报, 2016, 13(19): 29.
- [13] 陈华松, 张正军. 基于各向异性总边分的运动模糊盲复原方法[J]. 光电子激光, 2015, 26(16): 1206.
- [14] WANG Xiaoxu, YAN LiangQuan. Gaussian. Filter for Nonlinear Systems with One-step Randomly Delayed Measurements [J]. Automatica, 2013, 45(7): 1273.
- [15] 黄玉龙, 张勇刚, 李宁. 一种改进的高斯近似滤波方法[J]. 自动化学报, 2016, 42(3): 385.
- [16] 王宇. 图像去运动模糊算法研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [17] 李旭超, 宋博. 改进的正则化模型在图像恢复中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(12): 1730.
- [18] YANG L, LIU G H, SHI Z Y. Research on Suppression Algorithms of the Ringing Effect Caused by Blind Image Restoration [C] // Proceedings of the 5th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control. Qin-huangdao, China, 2015: 1264.
- [19] 辛迈, 王平, 耿建. 基于线性插值的图像分块分割算法[J]. 工业仪表与自动化装置, 2016(1): 118.
- [20] 赵煌, 彭勇. 双线性插值算法的优化及其应用[J]. 电视技术, 2012, 36(17): 30.
- [21] 龚梦欢, 胡宗福. 图像复原的边界振铃效应抑制算法[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2015, 33(6): 864.

(编辑: 温泽宇)