

盲复原图像振铃效应评价

左博新^{1),2)} 明德烈²⁾ 田金文²⁾

¹⁾(中国地质大学(武汉)计算机学院,武汉 430074) ²⁾(华中科技大学图像识别与人工智能研究所,武汉 430074)

摘要 线性空不变盲复原算法通常会在较为明显的边缘处产生振铃效应。振铃现象主要受噪声,复原算法种类,以及复原算法参数的选择的影响。提出了一种盲复原图像振铃效应评价方法。方法根据振铃效应的不同类型,使用 Gabor 滤波器,共生向量等方法分别对其进行评价,最后提出整体的振铃效应评价方法。实验结果表明,该方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,评价结果符合主观评价结果。

关键词 图像质量评价 复原 振铃效应 边缘 测度

中图法分类号: TP753 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)08-1244-10

No-reference Restoration Image Ringing Metrics

ZUO Boxin^{1),2)}, MING Delie²⁾, TIAN Jinwen²⁾

¹⁾(School of Computer, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

²⁾(Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Linear space-invariant image restoration algorithms often introduce ringing artifacts near sharp intensity transitions. It is shown that these artifacts are attributable to the noise, the different of the restoration parameters and the restoration algorithms. This paper presents a blind deconvolution image ringing metric. According to different ringing artifact types, two ringing metrics are presented to measure the ringing artifacts in restoration images by using Gabor filter and Co-occurrence vector etc. Finally, a whole ringing metric is proposed. The experimental results validate the proposed method perform well over a wide range of restoration image ringing levels and restoration algorithms. And the proposed model is in good agreement with MOS.

Keywords image quality assessment, restoration, ringing, edge, metric

0 引言

复原图像中普遍存在振铃效应,复原图像中的振铃效应直接影响到复原结果的质量。因此,对复原图像中振铃效应的评价是复原图像评价的一个重要部分,也是检验复原算法性能的一个重要方法。对于复原图像的评价以往主要采用的是均方差方法和峰值信噪比方法,这两种方法的评价结果往往受图像噪声影响较大,并且与人的主观视觉评价结果往往不相符,无法准确地评价复原图像中的振铃效应。

以往对于图像振铃效应的评价方法都是针对压缩所产生的振铃效应提出的,而压缩产生的振铃和复原产生的振铃形状和分布是完全不同的,如图 1 所示。在图 1 中,虚线 L_1 是原图像中一行的灰度值,实线 L_2 是对原图像进行 JPEG 压缩编码后的灰度值。在图像边界 P_1 附近, P_3 和 P'_3 之间, P_2 和 P'_2 之间有由于压缩所产生的振铃,虚线 L_3 是原图像中一行的灰度值,实线 L_4 是对原图像进行模糊加噪后,再复原得到的图像。在图像边界 Q_1 附近, Q_1 和 Q_2 之间, Q_1 和 Q'_2 之间有由于复原所产生的边缘振铃, Q_2 和 Q_3 之间, Q_2 和 Q'_3 之间有由于复原所产生的边界振铃。

基金项目:中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项(CUGL09030)

收稿日期:2008-02-28;改回日期:2008-10-07

第一作者简介:左博新(1980—),男。2009年于华中科技大学获工学博士学位。研究方向为图像复原、图像评价、模式识别、反问题求解。E-mail: tom9_zbx@163.com

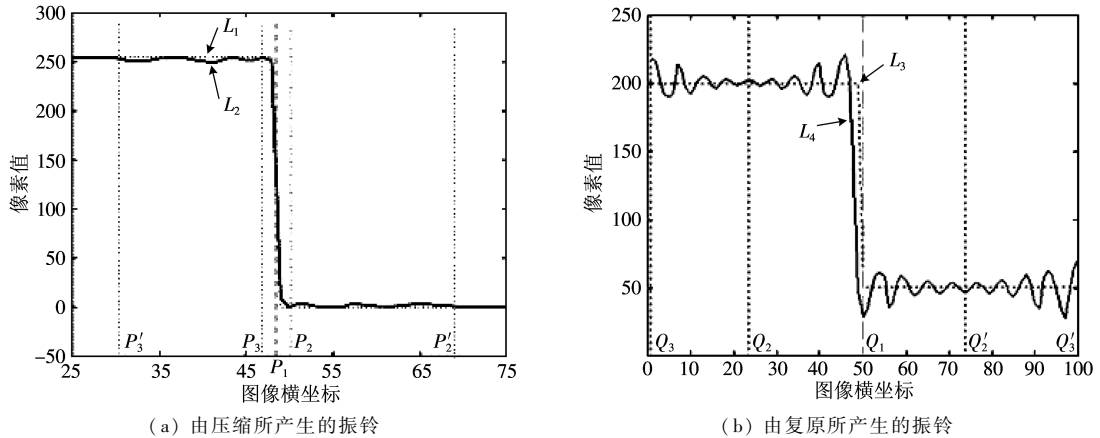


图 1 各种类型的振铃效应

Fig. 1 Various types of ringing artifacts

从图 1 可以看出,由复原产生的振铃和压缩所产生的振铃形状差异较大,因此,针对压缩振铃所提出的评价算法不适用于评价复原振铃。因此,需要一种符合人眼视觉特性和适用于复原振铃的振铃评价测度。根据以上的分析,将复原振铃根据其分布和位置的不同分为两类:边缘振铃和边界振铃。并提出使用 2D Gabor 滤波器和边缘检测算子来检测图像中的振铃,评价算法流程没有引用任何假设,并且对图像内容没有特殊的要求。

1 振铃效应

图像盲复原的目的是从退化的图像中复原出清晰的原图像,图像的退化有很多种类,例如传感器和场景之间的相对运动导致的运动退化,镜头的散焦导致的散焦退化,由于湍流和大气引起的退化等等,另外,模糊图像会存在附加的噪声退化,加噪的模糊退化图像模型^[1]为

$$g = s * o + n \quad (1)$$

式中, s 表示退化点扩展函数,可通过各种方法复原得到^[2-4], o, g 分别表示原图像和退化图像,噪声 n 为随机过程。根据以上的模型,复原求解过程为病态求解过程,原图像 f 不可能直接从退化图像 g 中完全复原,从退化图像 g 中可以复原出原图像 o 的近似解 \hat{o} 。

大多数的盲复原算法可以在数值上较好的近似原图像。但是,都会多少产生振铃现象,而这种在复原图像中出现的振铃在原图像中是不存在的,因此,这种振铃产生的程度,影响到了复原图像的质量。

振铃包括两种不同的类型:

- 1) 由图像边界产生的振铃(边界振铃);
- 2) 由图像中陡峭的灰度过渡(如边缘,点)产生的振铃(边缘振铃);

Woods 等人^[5]提出了第 1 种类型的振铃现象的存在原因,图像盲复原过程中,泄漏的高频分量在复原传递函数中被放大,在这个过程中产生了振铃现象。Westerink 等人^[3,5]提出了有效消除这种振铃效应的方法。第 2 种类型的振铃在线性空不变系统的复原结果中表现较为明显,其产生的原因是由于假设的图像表示模型和实际图像之间的误差。在图像复原结果中,由于复原参数,复原模型和噪声等原因,两种振铃的产生条件不同。在以往的压缩振铃图像评价方法^[6]中,没有区分这两种振铃效应。

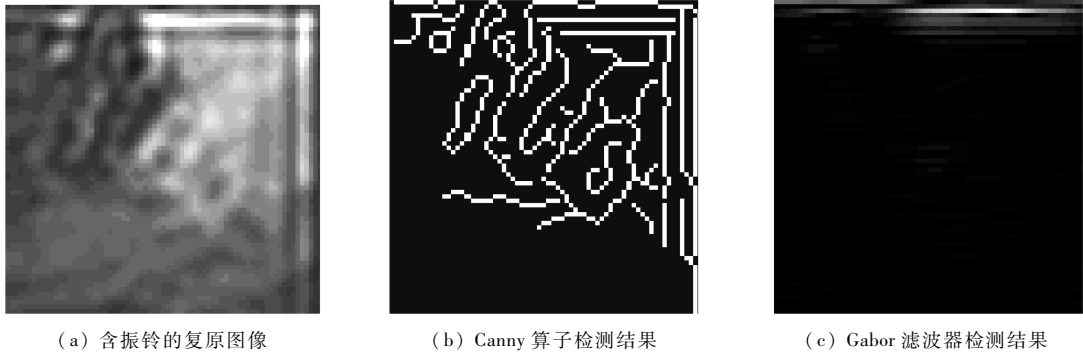
因此,根据以上的分析,在评价复原图像过程中将两种振铃分别考虑,以有效地评价在不同条件下复原图像中的振铃效应。

2 复原图像振铃测度

2.1 复原图像边界振铃测度

边界振铃退化效应是由图像复原过程中高频部分信息缺失而引起的。边界振铃效应通常表现为在图像边界附近平行于边界,由复原过程中图像的边界截断误差产生的波纹状振荡。

复原图像中除了有振铃的虚假边缘外,还有图像的真实边缘,传统的边缘检测算子,如 Sobel, Canny 和 Prewitt 算子在检测含有边界振铃的图像时,不能有效地区分振铃边缘和图像边缘(如图 2(b)所示),不适



(a) 含振铃的复原图像 (b) Canny 算子检测结果 (c) Gabor 滤波器检测结果

图 2 边界振铃的提取

Fig.2 Boundary ringing artifacts edge detection

用于边界振铃的检测。根据复原图像振铃方向性较强的特点,采用 Gabor 滤波器进行边缘检测,可以有效地检测出特定方向的振铃状虚假边缘(如图 2(c)所示)。

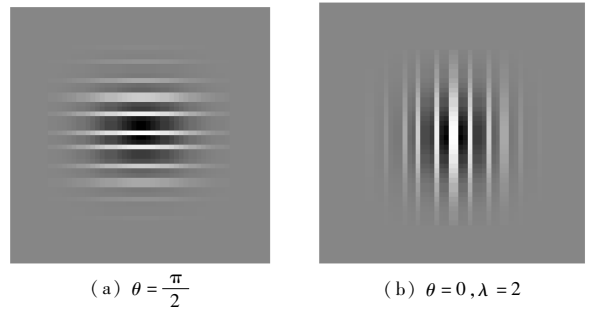
Gabor 滤波器理论最早见于 Gabor 的论著^[7]。Daugman^[8]将其扩展成 2 维形式,并构造了 2D Gabor 滤波器。它可同时获取时频域的最小不确定性,并与哺乳动物视网膜神经细胞的接收场模型相吻合。由于具有以上优点,Gabor 滤波器被广泛应用于计算机视觉的许多领域^[9-11],如纹理分割、边缘检测、模式识别、目标检测等。其中比较成功的是应用 Gabor 滤波器进行特征抽取。

Daugman^[7]给出 2D Gabor 滤波器基函数的一般形式:

$$G_{\lambda, \theta, \varphi, \sigma, \gamma}(x, y) = \exp\left[-\frac{(x')^2 + \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right] \cos\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \varphi\right) \quad (2)$$

式中, $x' = x \cos \theta + y \sin \theta$; $y' = -x \sin \theta + y \cos \theta$; (x, y) 为图像像素的位置坐标; θ_k 为滤波器方向 $\theta = \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$; φ 为相位偏置量, $\varphi = 0$ (对称滤波器); σ 为标准高斯方差, $\sigma = 0.28$; γ 为长径比, $\gamma = 0.9$; λ 为空域波长,根据后面章节提出的估计模型针对不同的复原

图像对 λ 进行估计;由于本文滤波的目的是提取与水平边界和垂直边界平行的振荡振铃,因此, θ 取两个方向 0 和 $\frac{\pi}{2}$, Gabor 滤波模板如图 3 所示。



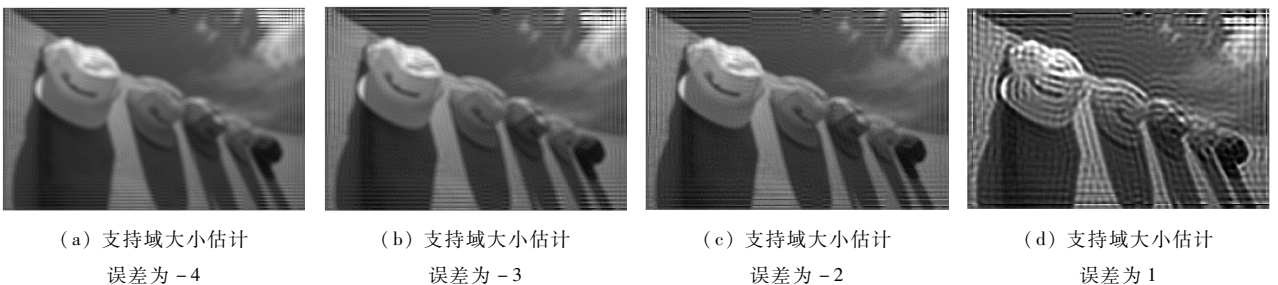
(a) $\theta = \frac{\pi}{2}$ (b) $\theta = 0, \lambda = 2$

图 3 不同方向的 Gabor 滤波模板

Fig.3 Gabor filter template in different direction

对于 Gabor 滤波器的参数的选取,除了方向参数 θ 决定边界振铃特征的方向外,频率参数 $1/\lambda$ 的选取对边缘振铃特征的提取有主要影响,Gabor 滤波器的响应频率应符合所检测的复原图像的边界振铃的频率。除 λ, θ 外,其他参数对特征提取没有影响,采用以上默认值。

复原图像中边界振铃的频率由于复原参数决定,在一定范围内变化,如图 4 所示。



(a) 支持域大小估计 误差为 -4 (b) 支持域大小估计 误差为 -3 (c) 支持域大小估计 误差为 -2 (d) 支持域大小估计 误差为 1

图 4 不同支持域误差的复原图像

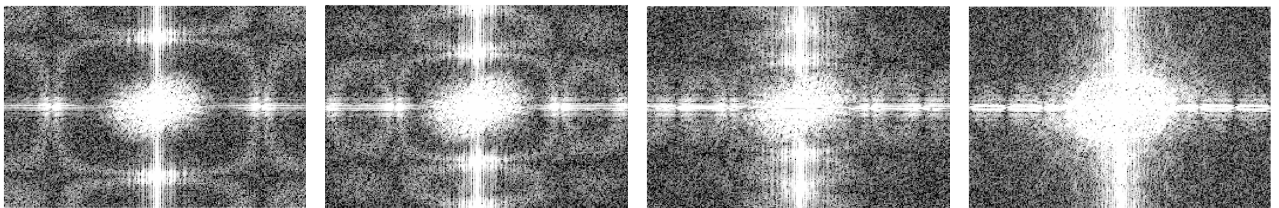
Fig.4 Restoration images with different restoration parameters

从图 4 可以看出,随着支持域估计误差的增大,复原图像中边界振铃的频率大体上逐渐降低。通过大量的对比实验,发现复原图像中边界振铃部分的频率和复原参数的变化趋势,变化快慢以及具体的算法有关。实验表明,复原图像中边界振铃的频率的变化会引起其在功率谱图像上明显的分布变化,如图 5 所示。

从图 5 可以发现,随着复原图像中振铃部分频率的降低,在功率谱图像中高频亮环的半径也逐渐缩小,逐渐由高频区域向低频区域靠近。因此,可以根据功率谱图像中边界振铃相应的频谱位置来判断复原图像中振铃的频率,从而确定 Gabor 滤波器的

频率参数。

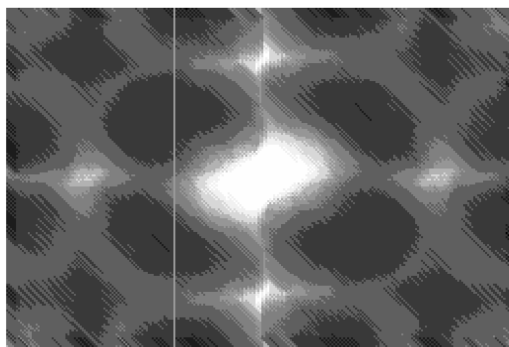
根据以上的分析,提出测量功率谱图像中边界振铃相应的位置来确定图像中振铃的频率的方法。为识别频谱图像中围绕中心低频区域的高频亮环位置,需要对频谱图像进行预处理,消除频谱图像中对识别有影响噪声,拉伸频谱图像对比度。具体过程如下:首先计算复原图像的功率谱图像,然后对功率谱图像进行去噪,对比度拉伸处理,依次取出图像中的一列,计算这列数据中主峰和距主峰最近的次峰的位置距离,取距离值最大的一列计算结果作为这个复原图像的功率谱特征距离 D 。以图 5(a) 相应的功率谱图像(如图 6)为例。



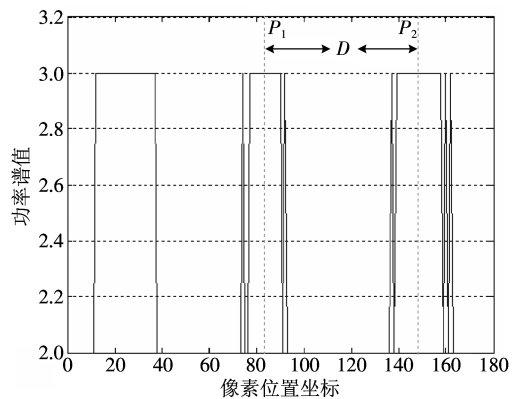
(a) 图 4(a) 的功率谱图像 (b) 图 4(b) 的功率谱图像 (c) 图 4(c) 的功率谱图像 (d) 图 4(d) 的功率谱图像

图 5 图 4 中各图相应的功率谱图像

Fig. 5 Power spectrum images of images in Fig. 4



(a) 功率谱预处理图像



(b) 选取列的频率值分布曲线图

图 6 频率分布分析

Fig. 6 Analysis of frequency distribution

对图 5 中每一幅图像分别进行相同的处理,各图的频率值变化曲线图如图 7 所示。

图 7 中各图中间的主峰是频谱的低频部分,越靠近两边频率越高。由于复原图像中振铃的频率越来越低,相应的功率谱图像中亮环的频率也越来越低,因此,从图 7(a) 到图 7(d) 高频部分越来越少,侧峰离主峰的距离也越来越近,在图 7(c) 和图 7(d) 中侧峰消失,并且主峰的宽度也逐渐降低。

根据以上的分析,提出以下的 Gabor 滤波器波

长 λ 选取公式。

$$\begin{cases} \lambda = \left\lfloor \frac{D}{\min(N_c, N_R)} \right\rfloor & \left\lfloor \frac{D}{\min(N_c, N_R)} \right\rfloor > 0 \\ \lambda = 8 & \left\lfloor \frac{D}{\min(N_c, N_R)} \right\rfloor = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, N_c, N_R 分别为图像的列数和行数, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取下界整数。

根据式(3)求出不同的 Gabor 滤波器频率参数 $1/\lambda$, 可以得到相应的滤波模板, Gabor 滤波图像可

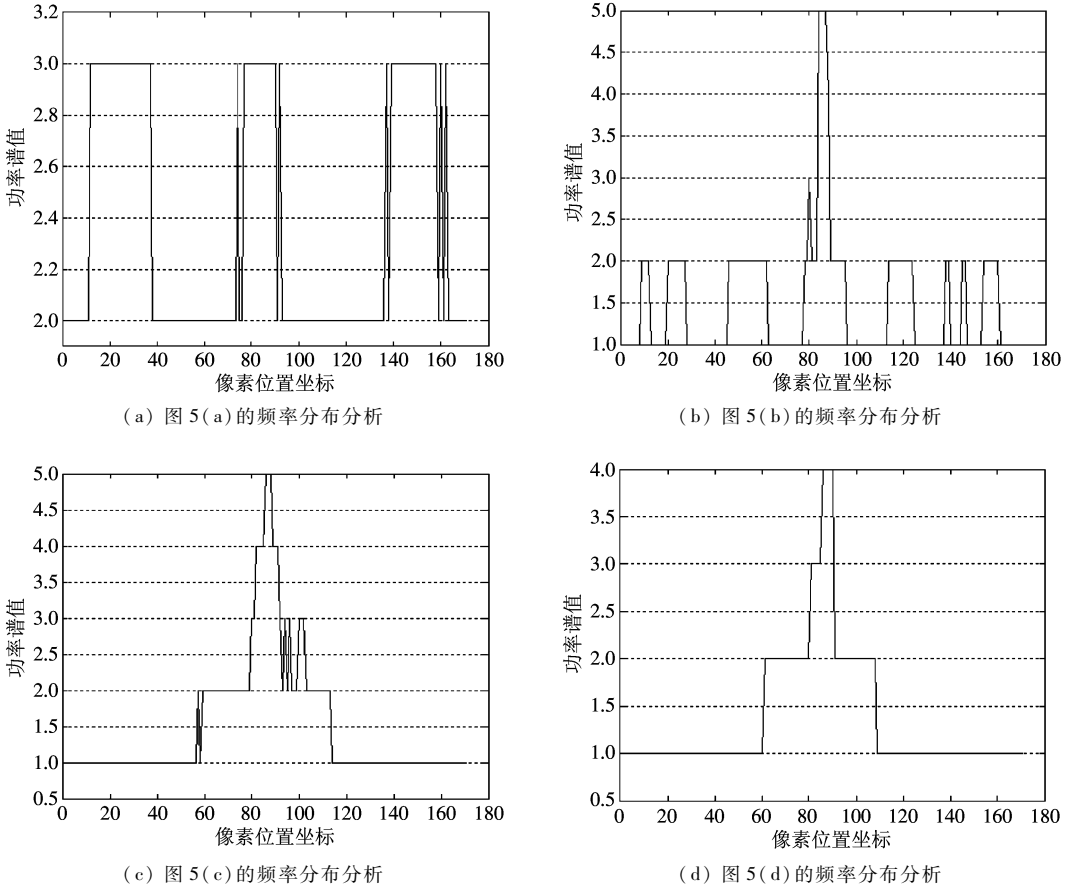


图 7 图 5 相应各图的频率分析

Fig. 7 Frequency distribution analysis of images in Fig. 5

以根据所求得滤波模板和下式得到:

$$R_{\theta}(x, y) = \iint f(x, y) G_{\theta}(x - u, y - v) du dv \quad (4)$$

式中, $R_{\theta}(x, y)$ 为响应图像, $G_{\theta}(x - u, y - v)$ 为滤波模板。

得到 Gabor 滤波响应图像后, 对 Gabor 响应图

像的振荡强度进行估计。以图 4(a), 图 4(b) 为例, 图 8 曲线表示的分别是其相应的 Gabor 滤波响应图像中的一列。其中, H_2, H_3 是一个振荡周期, 则这个振荡周期的振荡强度为 $H_2 - L_2 = 61$ 。而这一行图像的振荡强度是这一行中所有振荡周期的振荡强度

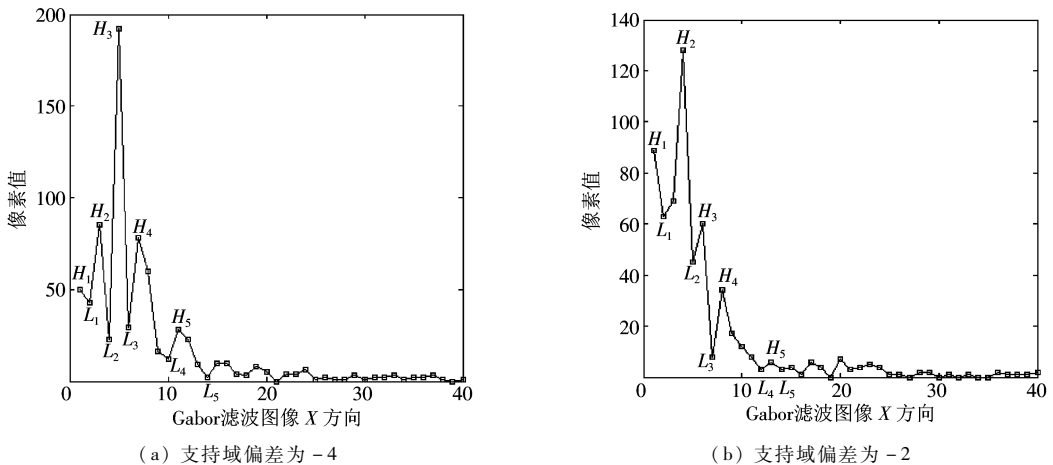


图 8 不同参数误差的复原图像 Gabor 滤波结果

Fig. 8 The Gabor filter results of restoration images in different parameters error

的总和 $\left(\sum_{i=1}^n(H_i - L_i)\right)$ 。逐行计算出所有行的振荡强度,比较求出最大的行振荡强度作为该方向的振荡强度。则整体边界振铃效应的测度定义为

$$V = \max\left(\sum_{i=1}^n(H_{iv} - L_{iv})\right) + \max\left(\sum_{i=1}^n(H_{ih} - L_{ih})\right) \quad (5)$$

式中, $H_{iv}, L_{iv}, H_{ih}, L_{ih}$ 分别表示在垂直和水平方向上,第 i 个振荡周期中的振荡峰值点和谷值点。

使用 Gabor 滤波器对复原图像中边界振铃的进行评价的具体流程如图 9 所示。

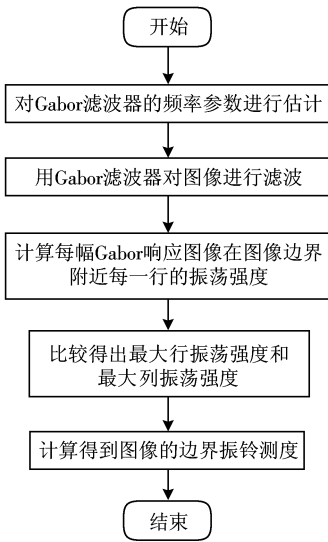


图9 边界振铃测度流程图

Fig. 9 Flowchart of boundary ringing artifacts metric

在图像的过迭代过程中,复原图像中边界振铃现象随着估计点扩展函数支持域大小偏离实际支持域大小的增加而越来越严重,在 2.1 节中的实验中证明,随着复原参数偏离真实值程度增加,等范围的图像边界附近,振铃产生的虚假边缘条数增加,震荡振铃纹理加密,振幅增加,振荡加剧,相应的边界振铃评价价值变大。

2.2 复原图像边缘振铃测度

复原图像边缘振铃效应通常表现为:在图像边缘,特别是梯度值较大的边缘,在复原后,会在复原图的边缘附近出现与原图边缘形状相同的重复振荡纹理。通常在提取的边缘特征图像上表现为多条相同形状的平行曲线。根据复原图像边缘振铃的特点,采用对复原图像进行边缘特征提取后,对边缘特征图像中的平行曲线进行提取和统计,根据统计结

果评价图像中存在的边缘振铃的强弱。

首先,使用边缘检测算子(Canny 算子)检测图像的边缘,得到二值边缘特征图像,图像中的噪声和一些无意义的边缘通过设置门限的方法加以去除。

采用共生向量(co-occurrence vector)的测度来检测边缘特征二值图像中平行的振铃曲线。在二值边缘特征图像 $E(x, y)$ 上,在长度为 d ,方向为 θ 的共生向量 $C_d^\theta(i, j)$ 定义为

$$C_d^\theta(i, j) = \begin{cases} 1 & E(i, j) = 1 \& E(i + d\cos\theta, j + d\sin\theta) = 1 \\ & \& E(i + s\cos\theta, j + s\sin\theta) = 0 \\ & (0 < s < d) \\ & \left(\theta = 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}\right) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

在实际的二值边缘图像中,平行曲线由于提取误差和曲线不同位置的曲率的不同,在平行曲线上各个位置,度量某一方向上(如水平方向)上两曲线之间的距离,数值通常不会相等。因此,在共生向量 $C_d^\theta(x, y)$ 的距离 d 的选取上通常设置一定范围的冗余度 γ ,距离参数 d 范围在 $(d - \gamma, d + \gamma)$ 之间。本文实验中 $\gamma = 3$;

首先,对复原图像的二值边缘特征图像使用共生向量 $C_d^\theta(x, y)$ 对边缘特征图像进行扫描,其中 θ 为扫描方向(共需扫描 $0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}$ 4 个方向), $d = \frac{N_s}{2}$, (N_s 为已知的复原算法估计的点扩展函数支持域大小)。扫描所有图像内像素值不为零的像素在 $(\theta = 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4})$ 各个方向,距离在 $(d - \gamma, d + \gamma)$ 范围内的共生像素。由于已经对边界引起的振铃进行了估计,为了避免重复的计算,在靠近图像水平边界和垂直边界范围 D 内,分别省略 0 和 $\frac{\pi}{2}$ 方向的共生向量计算。对检测出的共生像素进行加和得到,总体由于图像边界引起的振铃的测度值(m 为检测方向 θ 的方向个数, $m = 4$):

$$W_m = \sum_{\theta=1}^m C_\theta^d(x, y) \quad (7)$$

W_m 大于 0,小于图像总像素点个数,它表示由于边缘产生的振铃边缘长度值。

2.3 复原图像总体振铃测度

由于各种复原方法的不同,复原参数的不同,和初始参数估计误差的不同,以上提到的两种振铃效应在复原图像中的比例不尽相同。针对不同复原评

价要求,以及两种振铃评价的侧重点的不同要求,提出以下的总体评价测度:

$$C_{\text{sum}} = \alpha \frac{V_n - V_o}{\sqrt{MN}} + \beta \frac{W_m - W_o}{\sqrt{MN}} \quad (8)$$

式中, α, β 分别表示测度权重系数, $\alpha + \beta = 1$,针对不同的要求调整数值,例如,对于目标识别系统,由于目标大多在图像的中心,在对图像中心区域复原质量要求较高的情况下,可以将增大 β 的大小,则整体测度值对于图像中心区域的边缘振铃更加敏感。如果要求只测量图像的边界振铃效应,则可以将 β 设为0,不考虑边缘振铃对于图像整体振铃测度的影响。为排除图像中存在类似振铃效应的纹理对评价结果的影响,分别对原图像(复原前模糊图像)进行边界和边缘的振铃纹理检测,测度方法同上,其中, V_R 为复原图像的边缘振铃测度值, V_o 为原图像的边缘类振铃纹理测度值, W_R 为复原图像的边缘振铃测度值, W_o 为原图像的边缘类振铃纹理测度值, M, N 为图像的大小。从式(7)可知,测度 C_{sum} 值越大,振铃程度越严重;值越小振铃程度越小。总体测度流程图如图10所示。

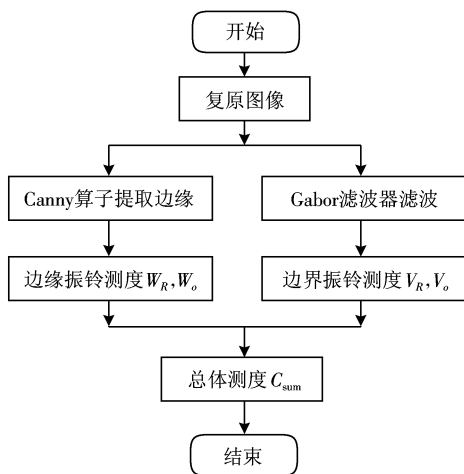


图 10 总体测度流程图

Fig. 10 Flowchart of overall metric

3 实验结果和分析

为了测试本文提出的测度是否符合人眼视觉特性,本文采用了主观实验和客观仿真实验相结合来测试评价准则,在主观实验部分,由10名长期从事图像处理的人员对测试图像进行主观评价,测试图像来自标准测试库。在客观实验部分,用总变分(TV)复原算法,采用不同的偏差复原参数对模糊图

像进行复原。为测试测度对图像内容的敏感度,实验采用10幅,8 bit标准的清晰图像作为原图像,由于篇幅原因,列出其中5幅如图11和图12(a)所示。



(a) 测试图 1

(b) 测试图 2



(c) 测试图 3



(d) 测试图 4

图 11 测试图像

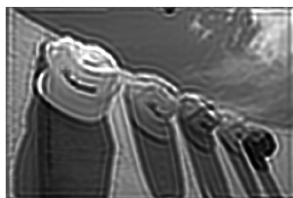
Fig. 11 Test images



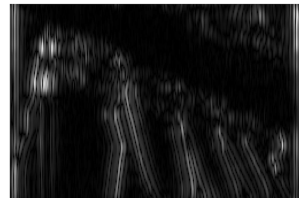
(a) 原图像



(b) 模糊退化图像



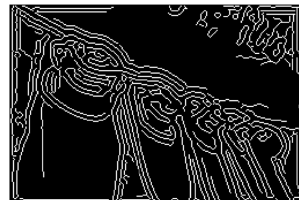
(c) 复原图像



(d) 垂直方向 Gabor 滤波结果



(e) 水平方向 Gabor 滤波结果



(f) Canny 提取边缘

图 12 边缘提取

Fig. 12 Edge detection

退化图像如图12(b)所示,退化采用的点扩展函数(PSF)的支持域大小为 9×9 。复原采用TV复原算法对其进行复原,复原采用带有误差的支持域

估计参数,支持域估计大小为 12×12 ,结果如图 12(c)所示。对复原图像进行 Gabor 滤波,在水平和垂直方向的结果分别如图 12(d)和图 12(e)所示。图 12(f)为对复原图像进行 Canny 算子检测的结果。采用误差 $(-5, 5)$ 之间的支持域估计误差(间隔为 1,如表 1)对图像分别复原,然后使用 Gabor 滤波器和 Canny 算子对复原图像进行滤波。根据以上方法分别处理 10 幅测试图像。由于篇幅原因,以图 12(a)测试过程为例。

采用误差 $(-5, 5)$ 之间的支持域估计误差对图像分别复原,图 12(b)的部分复原结果如图 12(c)所示。对复原结果分别使用 Gabor 滤波器和 Canny 算子进行滤波,过程类似图 12(b),图 12(d)所示。根据以上方法分别处理 10 幅测试图像。因此,客观评价实验需要评价复原图像 $10 \times 8 = 80$ 幅。

在得到不同图像的不同参数的复原结果后,根据本文提出的测度,对复原出的图像进行分别的测量,以其中两幅为例,结果如表 1 所示。

表 1 复原图像的评价结果
Tab. 1 Evaluation of restoration image

PSF size estimated error	图 11(a)			图 12(a)		
	V	W	C_{sum}	V	W	C_{sum}
-5	584	0	1.395 6 $\lambda = 2$	558	0	1.612 1 $\lambda = 2$
-4	465	625	2.604 8 $\lambda = 2$	496	394	2.903 5 $\lambda = 2$
-3	384	1 044	3.412 6 $\lambda = 2$	360	645	2.903 5 $\lambda = 2$
-2	256	1 529	4.265 7 $\lambda = 3$	327	790	3.227 1 $\lambda = 3$
2	192	2 572	6.605 3 $\lambda = 4$	296	986	3.703 8 $\lambda = 4$
3	267	3 846	9.829 4 $\lambda = 6$	297	1 642	5.601 9 $\lambda = 6$
4	466	5 176	13.482 9 $\lambda = 8$	304	2 062	6.835 5 $\lambda = 8$
5	489	5 840	15.124 7 $\lambda = 8$	327	3 399	10.765 $\lambda = 8$

注: $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$ 。

比较图 11(a)和图 12(a)的测量结果,可以发现纹理较为复杂的图像复原后会产生更多的边界振铃,与实际复原情况相符。

根据图像复原实验,总体上,复原参数的误差越大,图像中振铃效应,模糊效应越严重。尽管图 4(a)的 PSF 支持域估计误差大于图 4(c),并且图 4(a)的边界振铃效应大于图 4(c)的边界振铃效应。但是,图 4(c)的模糊效应减少了,更多的图像边缘被复原出来,并出现了边缘振铃现象,因此图 4(c)中有更多的边缘振铃。图 4(c)的整体振铃测度值也大于图 4(a)的测度值。

图 13 表示的是振铃测度值和估计 PSF 误差之间的关系,测试图像来自图 11 和图 12(a),5 幅图像每幅图像使用 8 个不同的 PSF 估计误差分别被复原 8 次,算法迭代次数为 3,根据复原图像使用本文提出的测度进行测量, $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$ 。在主观实验部分,测试者随机从主观上分别评价每个复原结果($5 \times 8 = 40$ 幅),并根据图像的质量,给出 1~10 之间的评分,评分越高图像质量越好,振铃情况越轻。图 13(d)反映了本文测度值与主观分数均值 scores-Mean Opinion Score(MOS)之间的关系。

较大的 PSF 估计误差会导致复原图像中更多的边缘振铃(如图 13(b)所示),而在有较大的 PSF 估计误差绝对值的情况下,会产生更严重的边界振铃(如图 13(a)所示)。随着 PSF 估计误差的不断增大,振铃总体测度值也不断地增加(如表 1 所示),这与实际情况相符,也与主观实验评价结果相符。

对于不同复原算法,由于算法的求解模型的差异,复原图像与原图像的误差和复原图像中的振铃情况也有所不同,本文列举了几种具有代表性复原算法:总变分(TV)复原算法,MAP(maximum a posteriori)复原算法和 Lucy-Richardson 复原算法的复原结果。测度针对各种复原算法对图 11、图 12(a)的复原结果图像的评价如图 14 与表 2 所示。

比较图 14 和表 2 中各种复原算法的复原图像和复原图像的评价结果,对各幅图像的边界振铃、边缘振铃和总体振铃的评价结果符合人眼特性和主观评价结果,说明本文提出的测度适用于各种不同复原算法的复原结果的评价。

最后比较本文提出的测度和 Pina Marziliano^[6]提出的测度。采用不同的估计误差点扩展函数进行复原,并对以上提到的 80 幅复原结果图像进行主观评价,用提出的测度进行评价(测度参数 $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$),最后用 Westerink^[3]提出的测度进行评价。并把主观评价结果和两种测度的估计结果进行比较。结果如图 15 所示。

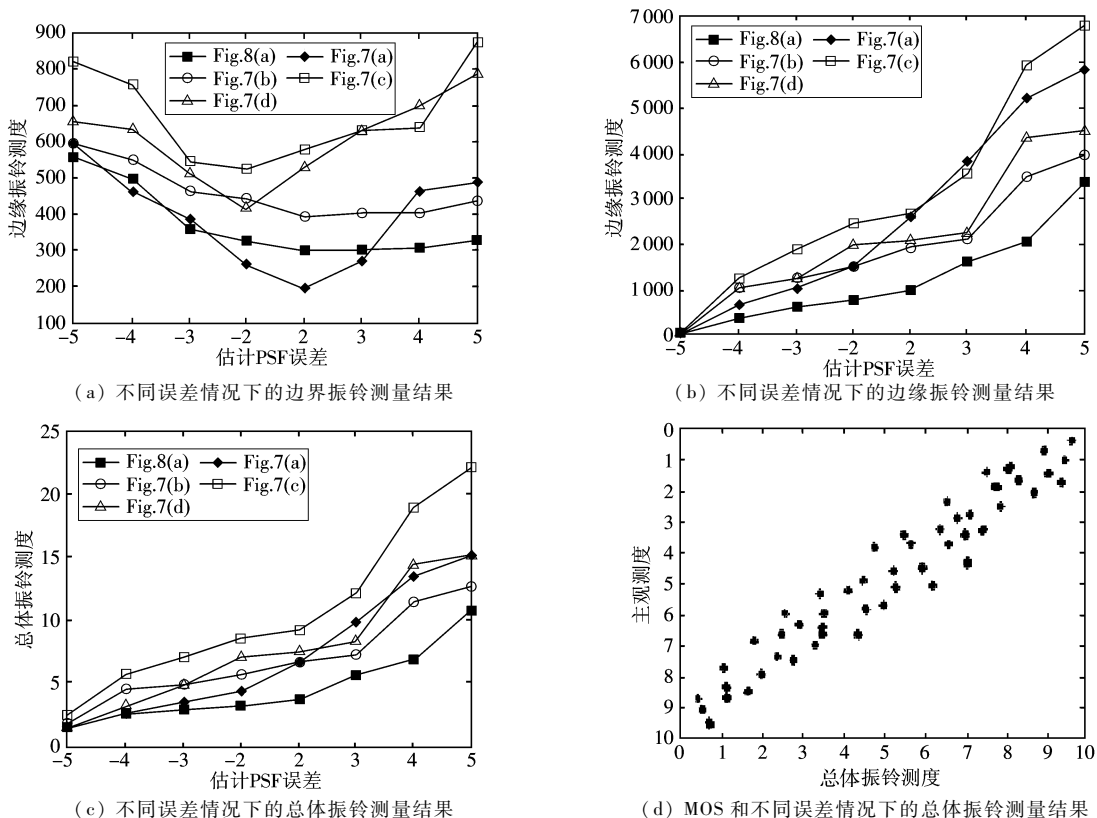


图 13 不同估计误差复原图像的评价结果

Fig. 13 The evaluation results of restoration images in different parameters error

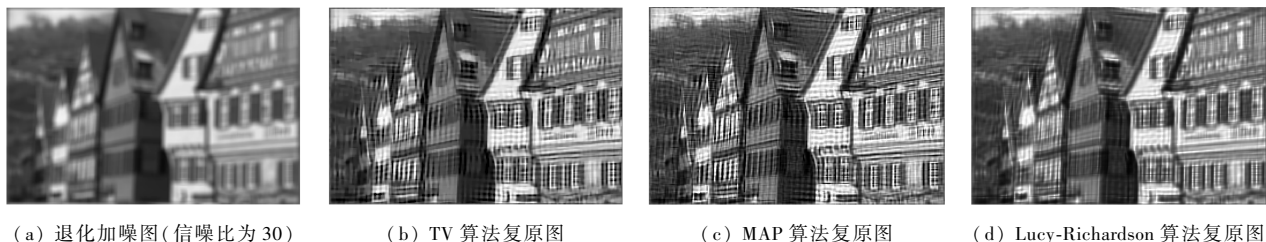


图 14 各种算法的复原图

Fig. 14 The restoration results of various algorithms

表 2 图 11(a) 复原图像的评价结果

Tab. 2 The evaluation of the restoration image

	算法		
	TV	MAP	Lucy
W	3 030	3 392	2 138
V	399	482	256
C_{sum}	11.967	13.43	8.419 6
	$\lambda = 8$	$\lambda = 8$	$\lambda = 8$

注: $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$ 。

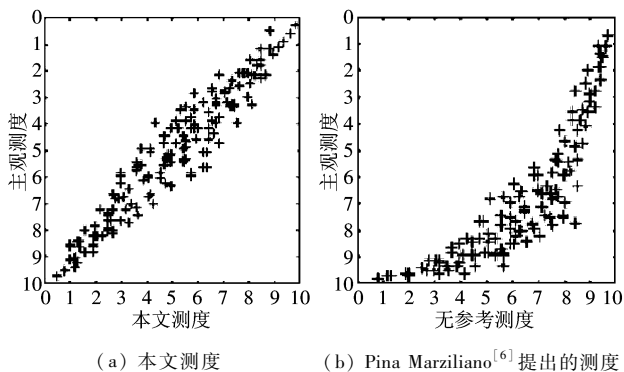


图 15 与其他测度的对比

Fig. 15 Comparison with other metric

由图 15 看出,本文提出的算法的评价结果更符合主观测度,可以正确反映复原图像的振铃效应在主观上的差别。

4 结 论

本文提出了一个符合人眼视觉特性的复原图像振铃评价准则,对于复原图像中的边界振铃和边缘振铃,分别提出了不同的方法进行测量,并提出了总体的振铃测度。通过对图像的仿真退化和仿真退化复原结果的评价和比较,表明本测度能够有效地评价图像中存在的振铃现象,并且经多幅图像测试表明,测度对图像没有特殊要求,不会由于图像内容的不同而产生不符合主观测度的评价。通过实验证明,测度对于不同的复原算法具有较强的鲁棒性。在主观实验中,本文和其他的测度进行了比较,结果表明本文提出的测度相比其他测度更符合人眼的视觉特性。

参考文献 (References)

- [1] Andrews H C, Hunt B R. Digital Image Restoration [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1977: 188-189.
- [2] Biemond J, Putten F G, Woods J W. Identification and restoration of images with symmetric noncausal blurs [J]. IEEE Transactions on Circuits System, 1988, 35(4): 385-393.
- [3] Westerink P H, Biemond J, Bruin P H Le. Digital Color Image Restoration [M]//Signal Processing III: Theories and Applications. The Netherlands: Elsevier North-Holland, 1986: 761-764.
- [4] Molina R, Mateos J, Katsaggelos A K. Blind deconvolution using a variational approach to parameter, image, and blur estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(12): 358-362.
- [5] Woods J W, Biemond J, Tekalp A M. Boundary value problem in image restoration [C]//Proceedings of IEEE International Conference Acoustics, Speech, Signal Processing. New York: IEEE, 1985: 692-695.
- [6] Marziliano P, Dufaux F. Perceptual blur and ringing metrics: application to JPEG2000 Signal Processing [J]. Image Communication, 2004, 19(2): 163-172.
- [7] Gabor D. Theory of communication [J]. Journal of Institute for Electrical Engineering, 1946, 93(26): 429-457.
- [8] Daugman J G. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters [J]. Journal of the Optical Society of America, 1985, 2(7): 1160-1169.
- [9] Daugman J G. Complete discrete 2D Gabor transforms by neural networks for image analysis and compression [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1988, 36(7): 1169-1179.
- [10] Lee C J, Wang S D. Fingerprint feature extraction using Gabor filters [J]. Electronics Letters, 1999, 35(4): 288-290.
- [11] Hamada T, Kato K, Kawakami K. Extracting facial features as in infants [J]. Pattern Recognition Letters, 2000, 21(5): 407-412.