

文章编号 1004-924X(2014)02-0459-08

基于视觉对比敏感度与恰可察觉失真感知的图像复原

杨亚威^{1,2*}, 李俊山¹, 张士杰¹, 芦鸿雁^{1,3}, 胡双演¹

(1. 第二炮兵工程大学 信息工程系, 陕西 西安 710025;
2. 96215 部队, 广西 柳州 545616; 3. 武警工程大学, 陕西 西安 710086)

摘要: 针对传统复原算法在低信噪比情况下复原结果感知效果差的问题, 提出了一种基于视觉对比敏感度与恰可察觉失真感知的图像复原方法。首先, 利用离散余弦变换(DCT)分解图像, 将图像编码为不同尺度下的一系列子带, 利用概率和模型及 DCT 感知模型计算每条子带的恰可察觉失真阈值, 并采用明可夫斯基距离计算失真度量; 然后, 对于每个尺度下的每条子带, 利用一个迭代的二分程序来调整每个尺度下的每条子带的通道权重, 直至子带的失真度量恰好等于期望的失真阈值; 最后, 利用对比敏感函数对每条子带中的系数进行视觉敏感度加权, 通过 DCT 逆变换对视觉感知加权后的系数进行重构以得到最终的复原图像。基于 LIVE 图像库的实验结果表明, 本文复原算法不仅能够有效地增加图像的信噪比, 而且能够很好地改善图像的感知质量。

关键词: 图像复原; 视觉对比敏感度; 恰可察觉失真; 离散余弦变换

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0459

Image restoration based on visual contrast sensitivity and just noticeable distortion perception

YANG Ya-wei^{1,2*}, LI Jun-shan¹, ZHANG Shi-jie¹, LU Hong-yan^{1,3}, HU Shuang-yan¹

(1. Department of Information Engineering, the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;
2. No. 96215 Unit of the Chinese People's Liberation, Liuzhou 545616, China;
3. The Armed Police Force Engineering University, Xi'an 710086, China)
* Corresponding author, E-mail: 13484468703@163.com

Abstract: As traditional restoration algorithms have weaker perceptual opinion in a low Peak Signal Noise Ratio(PSNR), a novel image restoration approach based on visual contrast sensitivity and Just Noticeable Distortion(JND) perception was proposed. Firstly, the image was coded as a sets of bands in different scales with Discrete Cosine Transform(DCT), the JND threshold of each band was calculated with probability summation and DCT perception model, and distortion measure was calculated with a Minkowski metric. Then, an iterative bisection procedure was used to adjust the channel weight for each band in each scale until the perceptual distortion of band was just equal to the anti-

收稿日期: 2013-07-12; 修订日期: 2013-09-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61175120)

pant distortion threshold. Finally, the coefficient of each band was weighted with visual contrast sensitivity function, and the coefficient after visual perceptual weighting was reconstructed through an inverse DCT to gain the restoration image. Experimental results based on LIVE image database show that this algorithm can effectively enhance PSNR and improve perceptual quality of the recovery images.

Key words: image restoration; visual contrast sensitivity; just noticeable distortion; Discrete Cosine Transform(DCT)

1 引言

随着计算机多媒体技术和数字图像处理技术的发展,人们对图像分辨率的要求越来越高。但在成像过程中,受光学系统散焦、运动、大气扰动以及光电因素等一系列降质过程的影响,所得图像的分辨率往往很低。为了满足各种应用需求,需要对退化图像进行复原。图像复原是图像处理的主要分支之一,已广泛应用于国防、工业、医学等领域^[1-3]。

专业图像处理人员能够利用数字图像处理软件如 PhotoShop 等很好地完成多种失真类型的图像修复。人类能够出色地完成该项任务,主要原因在于人眼能够很容易地量化不同区域的清晰度,并且能够智能使用工具或者调整参数来调整和修复失真图像。在这个复原模型中,感知图像清晰度成为图像复原的首要任务。但在目前的技术条件下,对计算机来说,对于图像失真程度的量化仍然是一项具有挑战性的难题。因此,研究人类视觉感知图像的机理和过程以更好地量化图像质量,对研究图像复原技术有重要的作用。

尽管人类视觉感知已经受到信号和图像处理研究人员的长期关注,但是传统的图像复原算法大都集中于研究一些简便可行的数学模型,以最小化失真准则来完成图像复原,例如 Ayers 和 Dainty 提出的迭代盲解卷积(Iterative Blind Deconvolution, IBD)算法^[4],Kundur 提出的非负支撑域递归滤波算法^[5],基于全变分的图像盲复原方法^[6-8]。这些方法都没有建立感知失真度量,对于信噪比较高的图像复原相对可靠,但在低信噪比的应用上,由于它们没有很好地与图像的感知质量联系,所以尽管复原结果可能会较好地改善图像的信噪比,但并不能使其达到一个令人满意的视觉感知效果。

Mannos 和 Sakrison^[9]首次把视觉科学的概

念应用到图像处理中。他们的研究表明,简单的数学失真度量,如 MSE 和 PSNR,不能可靠地预测图像之间感知质量的差异。基于心理学实验, Mannos 和 Sakrison 推断出了人类视觉系统的一些特性,并得出对比敏感度函数(Contrast Sensitivity Function, CSF)的闭合表达式,并指出在图像的失真度量中加入一些 CSF 的先验知识,能够更好地预测感知质量。在 Mannos 和 Sakrison 的工作之后,许多研究团体相继投入到人类视觉模型的研究之中。Nill^[10]扩展了 Mannos 和 Sakrison 模型,并提出了一种视觉感知加权的离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)图像编码方法。这种方法对于图像的压缩、复原和质量评价具有很好的应用价值。Ingo 和 Lina^[11]提出了一种具有感知失真控制的自适应图像编码方法,通过图像特征的局部自适应样式研究了人类视觉掩模的属性,并通过检测最小感知失真阈值计算了局部图像的失真敏感度剖面图,该编码方法能够适应图像数据变化的局部频率、方向和空间特性,很好地控制了图像编码和重构过程中的目标失真度。

图像复原是一个病态的逆问题,它的求解会出现多解的情况,并且观测数据的微小变化会使解出现很大变动。本文提出了一种基于视觉对比敏感度与恰可察觉失真感知的图像复原方法,通过附加一些视觉感知方面的先验知识来限制解的范围,以保证解的唯一性和优化性。

2 空间频率和视觉对比敏感度

空间频率是指每度视角内刺激图像或图形的亮暗作正弦调制的栅条周数,单位是 cycle/(°)。它根据 19 世纪数学家傅里叶提出的振动波形理论发展而来,用以描述视觉系统的工作特性。最初在物理光学中,空间频率指每毫米具有的光栅数,单位为 line/mm。60 年代将其引入到视觉的

研究中。这一概念的广泛运用,为视觉特性、图形知觉以及视觉系统信号传输、信息加工等研究提供了新的途径。利用空间频率描述视觉系统的特性时,栅条空间频率的大小和栅条本身的对比度都是重要的因素。栅条图形的对比度为(最高亮度-最低亮度)/(最高亮度+最低亮度)。调整某一空间频率下栅条的对比度,当观察者的正确分辨率为50%时,这个对比度就是该空间频率的对比阈限。对比阈限值的倒数即为观察者对这个空间频率的对比感受性。通过实验测定得知,人眼对比阈限随空间频率的改变而改变,即其是空间频率的函数,称之为对比敏感度函数,它类似于光学系统的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)。一般视力正常的观察者对7 cycle/(°)或8 cycle/(°)的栅条最敏感,高于或低于这个频率,感受性都降低。如果空间频率超过60 cycle/(°)时,不论怎样加大对比度,都看不清栅条。看不清栅条时的频率称为截止频率,它可以作为视觉锐度的指标。

不同实验得到的CSF虽然形式不同,但基本上都认为CSF是空间频率的函数,具有带通滤波器的性质,即在中频段敏感度较强,而高低频段敏感度降低。常用的CSF函数由Mannos和Sakrison^[9]提出,具体形式如下:

$$H(f) = 2.6 \times (0.192 + 0.114f) e^{-(0.114f)^{1.1}}, \quad (1)$$

其中:空间频率 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ (cycle/(°)), f_x 、 f_y 为水平、垂直方向的空间频率。CSF函数特性曲线如图1所示,由图1可以看出:CSF曲线在中频区域[3.6 30]处,对比度最敏感,在低频和高频处,敏感度明显下降。

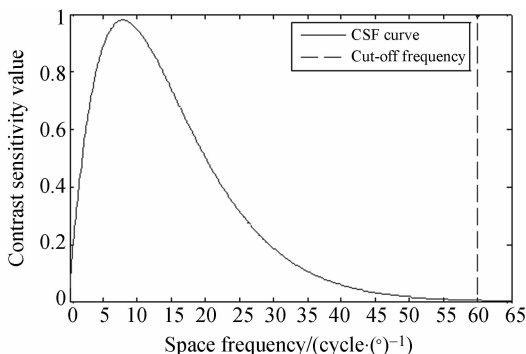


图1 CSF特征曲线

Fig. 1 CSF characteristic curve

3 基于视觉对比敏感度与恰可察觉失真感知的图像复原

3.1 恰可察觉失真与感知失真度量

要设计具有感知失真控制的图像复原方法,第一步是选择一种度量失真算法。在图像复原的过程中,确定失真恰好可感知的条件非常重要,即恰可察觉失真(Just Noticeable Distortion, JND)条件。因此,确定小于JND阈值的感知无失真的条件就成了图像复原的最终目标。通过定义一个基于JND的图像感知模型,就能够在空间域像素或者频域变换系数水平上量化图像的失真程度。

文中所用的感知失真度量方法基于概率和模型^[12-13],该模型每条子带各有一个独立的检测器。在子带系数 (b, n_1, n_2) 位置处检测到的失真的概率 $P_{(b, n_1, n_2)}$,也就是检测器将要发出失真信号的概率。 $P_{(b, n_1, n_2)}$ 由心理学函数决定,其建模一般为指数函数形式:

$$P_{(b, n_1, n_2)} = 1 - \exp\left(-\left|\frac{e(b, n_1, n_2)}{t_{\text{JND}}(b, n_1, n_2)}\right|^{\beta_b}\right), \quad (2)$$

其中: $e(b, n_1, n_2)$ 是 (b, n_1, n_2) 位置处的量化误差; $t_{\text{JND}}(b, n_1, n_2)$ 代表 (b, n_1, n_2) 位置处检测的JND阈值; β_b 是调节参数,调整其值以使心理学实验所得函数更好地与图像的特定失真类型吻合。在实验中研究了失真概率总和随空间的变化关系,得到该概率和模型中 $\beta_b \approx 4$ ^[13]。这样在式(2)中,检测概率 $P_{(b, n_1, n_2)} = 0.63$ 时,量化误差 $e(b, n_1, n_2)$ 与JND阈值相等。这个检测概率将作为感知无失真复原的目标。

文献[13]求解概率和时,假设对于一个感兴趣区域 $R = \{(b, n_1, n_2) : (b, n_1, n_2) \text{ in a specified region}\}$ 共用了局部化检测概率 $P_{(b, n_1, n_2)}$ 。采用该假设,可以计算出很小的局部化失真检测概率。该概率和方案基于以下2个重要假设:

假设1:在感兴趣区域 R 中只要有一个检测器发出存在失真的信号,即可检测到失真;也就是说,只要有一个量化误差 $e(b, n_1, n_2)$ 高于JND阈值,则认为其失真是可察觉的。

假设2:一个特定的检测器发出存在失真的概率与其它检测器发出失真的概率间是独立的;即检测概率 $P_{(b, n_1, n_2)}$ 是独立的。

在人类视觉系统中,最高的视觉锐度受凹区大小的限制,大约覆盖 2° 大小的视觉角度^[11]。令 $F_{(b,n_1,n_2)}$ 代表子带 b 中以 (n_1, n_2) 为中心,覆盖 2° 视觉角度的区域,这样,在以 (b, n_1, n_2) 为中心的凹区中检测到失真的概率 $P_{F_{(b,n_1,n_2)}}$ 可写为:

$$P_{F_{(b,n_1,n_2)}} = 1 - \prod_{(b',m_1,m_2) \in F_{(b,n_1,n_2)}} (1 - P_{(b',m_1,m_2)}). \quad (3)$$

把式(2)代入式(3)可得:

$$P_{F_{(b,n_1,n_2)}} = 1 - \exp(-D_{F_{(b,n_1,n_2)}}), \quad (4)$$

其中:

$$D_{F_{(b,n_1,n_2)}} = \left(\sum_{(b',m_1,m_2) \in F_{(b,n_1,n_2)}} \left| \frac{e(b',m_1,m_2)}{t_{\text{JND}}(b',m_1,m_2)} \right|^{\beta_b} \right)^{1/\beta_b}, \quad (5)$$

式中: $D_{F_{(b,n_1,n_2)}}$ 采用指数为 β_b 的明可夫斯基距离的形式。从式(4)可以清楚地看出,在凹区 $F_{(b,n_1,n_2)}$ 中最小化检测到失真的概率等同于最小化 $D_{F_{(b,n_1,n_2)}}$ 。

子带 b 的失真度量 D_b 被定义为在子带 b 中任意凹区 $F_{(b,n_1,n_2)}$ 检测到失真的最大概率。子带 b 中共用的凹区失真 $D_{F_{(b,n_1,n_2)}}$ 可利用 $\beta \rightarrow \infty$ 的明可夫斯基距离来获得(这相当于一个最大化操作),公式如下:

$$D_b = \max_{n_1, n_2} \{ D_{F_{(b,n_1,n_2)}} \}, \quad (6)$$

整幅图像的全局失真度量被定义为所有凹区检测到失真的最大概率,其通过子带内和子带间共用的凹区失真 $D_{F_{(b,n_1,n_2)}}$ 表示,利用 $\beta \rightarrow \infty$ 的明可夫斯基距离来获得,公式如下:

$$D = \max_b D_b = \max_{(b,n_1,n_2)} \{ D_{F_{(b,n_1,n_2)}} \}. \quad (7)$$

3.2 DCT 系数的 JND 阈值

本文采用 DCT 来分解和重构图像。DCT 把图像分解为具有频率和方向选择性的子带,这些子带的自身敏感性和掩码属性是不同的。第 n 条子带由第 n 个 DCT 变换系数的集合组成。令 $c_{i,j,k}$ 代表第 k 个 8×8 块在位置 (i, j) 处的 DCT 系数,这里 k 是以逐行扫描顺序所得图像块的序号,并且 $0 \leq i, j \leq 7$ 。假设图像由 K_1 个沿垂直方向的 8×8 块和 K_2 个沿水平方向的 8×8 块构成。那么,将 DCT 图像 1 块的系数 $c_{i,j,k}$ 映射到 DCT 子带 $c_{(b,n_1,n_2)}$ 中,可得结果如下:子带序号 $b = 8i + j$,子带内系数的位置分别为 $n_1 = \lfloor k/K_2 \rfloor, n_2 = k - n_1 K_2$ 。所有的 DCT 变换系数相当于在保留 DCT

块空间排序的同时把相同的二维 DCT 基函数集合到一个子带中。

DCT 系数量化失真的感知模型为每条子带提供了一个 JND 阈值 $t_{\text{JND}}(b, n_1, n_2)$ 。通过对两种视觉效应(依赖于背景亮度的对比敏感性和对比度掩盖效应)建模来计算该阈值。基于此,JND 阈值 $t_{\text{JND}}(b, n_1, n_2)$ 可表示为:

$$t_{\text{JND}}(b, n_1, n_2) = t_{\text{DCT}}(b, n_1, n_2) \cdot \alpha_{\text{CM}}(b, n_1, n_2), \quad (8)$$

其中: $t_{\text{DCT}}(b, n_1, n_2)$ 是基于背景亮度调节的对比敏感度阈值, $\alpha_{\text{CM}}(b, n_1, n_2)$ 是调节对比度掩盖效应的阈值。

基于背景亮度调整的对比敏感度阈值 $t_{\text{DCT}}(b, n_1, n_2)$ 是子带 b 对于均匀亮度的背景产生一个对比度最小的视觉信号的度量。该阈值的倒数显示了在 DCT 基函数的频率和方向上,人眼对背景亮度的敏感性。

对比敏感度模型考虑了屏幕的分辨率、取景距离、最小显示亮度 L_{min} 和最大显示亮度 L_{max} 。为了使图像的分解和重构更加简单方便,它假设显示可以被 gamma 修正。这意味着在取景之前,信号强度可以线性地转化为亮度。

对比敏感度阈值 $t_{\text{DCT}}(b, n_1, n_2)$ 可通过下式计算^[14]:

$$t_{\text{DCT}}(b(i, j), n_1, n_2) = \frac{MT_{i,j}(n_1, n_2)}{2\alpha_i \alpha_j (L_{\text{max}} - L_{\text{min}})}, \quad (9)$$

其中: $T_{i,j}(n_1, n_2)$ 是 DCT 块 (n_1, n_2) 中由于 DCT 系数 $c_{i,j}$ 的量化产生的基于背景亮度调整的亮度误差的对比敏感度; M 是灰度级数; L_{min} 和 L_{max} 是最小和最大显示亮度; α_i 和 α_j 是 DCT 系数归一化因子,通过下式给定:

$$\alpha_p = \frac{1}{\sqrt{N_{\text{DCT}}}} \begin{cases} 1, & p=0 \\ \sqrt{2}, & p \neq 0 \end{cases}, \quad (10)$$

其中: N_{DCT} 代表 DCT 块的大小,文中其值等于 8。

$T_{i,j}(n_1, n_2)$ 取值基于 Ahumada 和 Peterson^[14] 的参数模型。该模型在 log 空间频率中通过一个抛物线近似估计 DCT 系数的对比敏感度。 $T_{i,j}(n_1, n_2)$ 通过下式计算:

$$T_{i,j}(n_1, n_2) = 10^{g_{i,j}(n_1, n_2)}, \quad (11)$$

其中:

$$g_{i,j}(n_1, n_2) = \lg \frac{T_{\text{min}}(n_1, n_2)}{r + (1-r) \cos^2 \Theta_{i,j}} + K(n_1, n_2) \cdot (\lg f_{i,j} - \lg f_{\text{min}}(n_1, n_2))^2. \quad (12)$$

与 DCT 系数 $c_{i,j}$ 相联系的空间频率 $f_{i,j}$ 计算如下:

$$f_{i,j} = \frac{1}{2N_{\text{DCT}}} \sqrt{\frac{i^2}{\omega_x^2} + \frac{j^2}{\omega_y^2}}. \quad (13)$$

$f_{i,j}$ 的方向角度 $\Theta_{i,j}$ 的计算如下:

$$\Theta_{i,j} = \arcsin \frac{2f_{i,0}f_{0,j}}{f_{i,j}^2}. \quad (14)$$

抛物线的参数依赖于亮度,通过以下公式计算:

$$T_{\min}(n_1, n_2) = \begin{cases} \left(\frac{L(n_1, n_2)}{L_T}\right)^{\alpha_T} \frac{L_T}{S_0}, & L(n_1, n_2) \leq L_T \\ \frac{L(n_1, n_2)}{S_0}, & L(n_1, n_2) > L_T \end{cases}, \quad (15)$$

$$f_{\min}(n_1, n_2) = \begin{cases} f_0 \left(\frac{L(n_1, n_2)}{L_f}\right)^{\alpha_f}, & L(n_1, n_2) \leq L_f \\ f_0, & L(n_1, n_2) > L_f \end{cases}, \quad (16)$$

$$K(n_1, n_2) = \begin{cases} K_0 \left(\frac{L(n_1, n_2)}{L_K}\right)^{\alpha_K}, & L(n_1, n_2) \leq L_K \\ K_0, & L(n_1, n_2) > L_K \end{cases}, \quad (17)$$

其中:式(12)~式(18)中的恒量有 $r=0.7$; $N_{\text{DCT}}=8$; $L_T=13.45 \text{ cd/m}^2$; $S_0=94.6$; $\alpha_T=0.649$; $f_0=6.78 \text{ cycles/deg}$; $\alpha_f=0.182$; $L_f=300 \text{ cd/m}^2$; $K_0=3.125$; $\alpha_K=0.0706$; $L_K=300 \text{ cd/m}^2$. 屏幕距离和分辨率通过 ω_x 和 ω_y 输入,它们分别是视觉角度下水平和垂直方向的像素大小。局部背景亮度 $L(n_1, n_2)$ 计算如下:

$$L(n_1, n_2) = L_{\min} + \frac{L_{\max} - L_{\min}}{M} \left(\frac{\sum_{(0, m_1, m_2) \in F_{(0, n_1, n_2)}} c(0, m_1, m_2)}{N_{\text{DCT}} N(F_{(0, n_1, n_2)})} \right) + m_g, \quad (18)$$

其中: M 是图像中灰度级的数目; m_g 是输入图像的全局均值; $N(F_{(0, n_1, n_2)})$ 表示 (n_1, n_2) 位置处的凹区在子带 0 中包含的子带系数的个数。

用 D 表示以厘米为单位的取景距离(观察者与屏幕之间的距离); R 是每厘米用点的数量表示的显示分辨率; θ 是一个凹区所维持的视觉角度(大约为 2°); $N(F_{(b, n_1, n_2)})$ 能够通过下式计算:

$$N(F_{(b, n_1, n_2)}) = \left(\left\lfloor \frac{2DR \tan(\theta/2)}{N_{\text{DCT}}} \right\rfloor \right)^2, \quad (19)$$

其中:符号 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取邻近的最大整数。例如,当取景距离为 $D=60 \text{ cm}$ 时,显示分辨率为 $R=32 \text{ dots/cm}$, $N_{\text{DCT}}=8$, $\theta=2^\circ$ 时, $N(F_{(b, n_1, n_2)})=16$ 。

对比度掩盖效应 $\alpha_{\text{CM}}(b, n_1, n_2)$ 是指一幅图像的成分(目标)由于另一个图像成分(掩模)的出现在视觉上所产生的改变。它度量了由一个掩模对比度函数引起的目标信号的检测阈值的变化。掩模敏感度剖面图被认为是目标阈值比掩模对比度(Target Threshold versus Masker Contrast, TvC)函数^[15-16],它描述了掩模对比度函数造成的检测阈值的变化。对比度掩盖效应的模型来源于正弦曲线栅格掩模的非线性变换模型^[15]。 $\alpha_{\text{CM}}(b, n_1, n_2)$ 通过下式给定:

$$\alpha_{\text{CM}}(b, n_1, n_2) = \begin{cases} \max\{1, \left| \frac{c_{F(b, n_1, n_2)}}{t_{\text{DCT}}(b, n_1, n_2)} \right|^{0.6}\}, & b \neq 0 \\ 1, & b = 0 \end{cases}, \quad (20)$$

其中: $c_{F(b, n_1, n_2)}$ 是凹区 $F(b, n_1, n_2)$ 中 DCT 系数的平均幅值。

3.3 具有感知失真控制的自适应图像复原

实现自适应图像复原的难点在于需要调整频域的编码系数以更好地适应人类视觉的感知特性,然而,为了确保重构出原始图像,许多编码系数是不能改变的。为了使复原图像满足期望的感知失真 D_T ,需要在不改变原始图像的情况下利用 JND 阈值 $t_{\text{JND}}(b, n_1, n_2)$ 自适应调整每个系数 $c(b, n_1, n_2)$ 的权重。

本文提出的具有感知失真控制的自适应图像复原方法的具体流程如下:首先,采用 DCT 变换分解图像,后续算法转入独立的处理频域中每个尺度下的每条子带;利用 2.2 节的方法计算 JND 阈值 $t_{\text{JND}}(b, n_1, n_2)$,并采用明可夫斯基距离计算子带失真 D_b 。这种量化过程从低通子带开始,这是由于它的值决定了对局部亮度的估计,而且计算其它子带的 JND 阈值时也是必须的。

然后,对每条子带引入一个标量的通道权重 ω_b 来减小目标的感知失真,并利用两断对分法对其进行调整^[17-18],直至目标的感知失真恰好达到期望的失真 D_T 。在每次迭代中,当前子带的感知失真度量 D_b 按照式(6)中的 JND 阈值 $t_{\text{JND}}(b, n_1,$

n_2)来计算。如果 $D_b \leq D_T$, 利用两断对分法增加 ω_b 的值, 否则减少。当 ω_b 不再改变时, 迭代过程终止。由于 ω_b 是一个 8 位整数, 最多迭代 9 次后, 两断对分处理过程即终止。确定通道权重 ω_b 的最优值之后算法转入下一个子带。

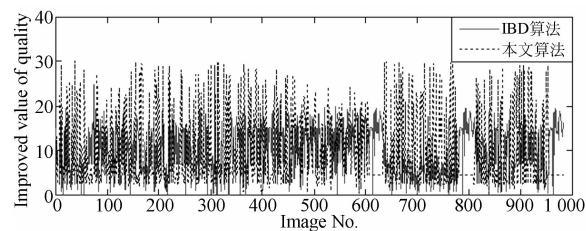
最后, 利用 DCT 逆变换进行图像重构。重复上述步骤, 直至 DCT 的所有尺度下的所有子带都通过通道权重调整后, 利用式(1)的视觉对比度敏感度函数对每条子带中的系数进行视觉敏感度加权, 加权后的系数 $\bar{c}_{n_s, n_c}^s = H(f_s) \cdot c_{n_s, n_c}^s$ 。其中: s 是尺度个数; n 表示该尺度的子带数; n_c 表示该子带的系数个数; 应用 DCT 逆变换对视觉感知加权后的系数进行重构以完成图像复原。

4 实验结果与分析

本文在 Intel(R) Xeon(R) 2.27 GHz CPU, 4G 内存的硬件环境和 Windows7 32 位系统, Matlab R2010a 的软件环境条件下进行了实验。实验采用 LIVE IQA 库^[19], 库中包含 5 种失真类型——JPEG、JPEG2000(JP2k)压缩、白噪声模糊(White Noise, WN)、高斯模糊(Gauss Blur, GB)和 Rayleigh 快衰落信道失真(Fast Fading, FF), 共 29 幅参考图像和 982 幅具有不同失真程度的退化图像。

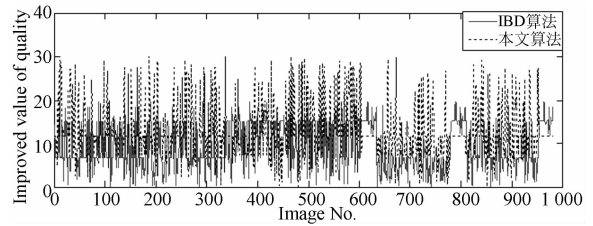
为客观评价算法的性能, 采用 BRISQUE^[20] 和 BIQI^[21] 2 种无参考型图像质量评价指标来定量评价复原效果, 2 种指标不仅能够很好地评价图像质量, 并且与人类视觉感知具有很高的一致性。

由于目前大多数复原算法往往针对某种类型



(a) 利用 BRISQUE 指标度量的图像质量提升值

(a) Improved value of image quality measured by BRISQUE index



(b) 利用 BIQI 指标度量的图像质量提升值

(b) Improved value of image quality measured by BIQI index

图 2 与经典迭代盲复原算法的性能对比

Fig. 2 Performance compared with classical IBD algorithms

的退化过程建立模型, 这使得所得算法仅仅对特定类型的失真具有很好的效果。为了证明本文算法是不依赖失真类型的, 本文选择了与失真类型不相关的经典 IBD 算法进行复原效果对比。对 LIVE 图像库中 5 种失真类型的图像的复原结果如图 2 所示。

在图 2 中, 横坐标代表图像序号, 依次对应 LIVE 图像库中 227 幅 JPEG2000、233 幅 JPEG、174 幅 WN、174 幅 GB 和 174 幅 FF 共 982 幅失真图像; 纵坐标代表质量评分 $[0, 100]$ 的提升值。从图 2 可以看出, 本文算法对 5 种失真类型的图像都有较好的复原效果, 图像的感知质量有了一定的提升。这也证明了本文算法可以应用于多种不同的失真类型, 比其它复原算法更加通用, 而且其复原效果也明显优于经典的 IBD 算法。

5 结论

本文提出了一种基于视觉对比敏感度与恰可察觉失真感知的图像复原方法。该算法根据人类视觉感知原理建立模型, 而不是针对图像的特定退化过程来完成图像复原, 所以该算法对失真类型不敏感, 实验结果也表明了该算法对多种失真类型都有较好的复原效果。由于采用的 DCT 变换并不是图像的最优稀疏表示方法, 所以本文算法具有一定的局限性。研究人类视觉编码信息的最新研究成果, 以寻求一种最优的图像稀疏表示方法将是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] LI D X, ZHAO Y, XU D. Algorithm of blur identification and image restoration based on parameter estimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 166-172.
- [2] 谢冰, 焦斌亮. 基于航天 TDICCD 相机像移分析的 PSF 估计及图像复原算法研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 936-940.
- XIE B, JIAO B L. The PSF estimation method and image restoration algorithm based on image-motion analysis of spaceborne TDICCD camera [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3): 936-940. (in Chinese)
- [3] 韩小芳, 胡家升. 运动与离焦模糊图像的复原[J]. 光子学报, 2012, 41(1): 87-93.
- HAN X F, HU J SH. Restoration of motion blur image and defocus blur image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(1): 87-93. (in Chinese)
- [4] AYERS G R, DAINTY J C. Iterative blind deconvolution method and its applications [J]. *Optics Letters*, 1988, 13(7): 547-549.
- [5] KURDUR D, HATZINAKOS D. Blind image deconvolution [J]. *IEEE Single Processing Magazine*, 1996, 13(3): 43-64.
- [6] MONEY J H, KANG S H. Total variation minimizing blind deconvolution with shock filter reference [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(2): 302-314.
- [7] 洪汉玉, 何成剑, 陈以超, 等. 基于各向异性规整化的总变分盲复原算法研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 118-122.
- HONG H Y, HE CH J, CHEN Y CH, *et al.*. Blind restoration algorithm of total variation based on anisotropic regularizations [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 118-122. (in Chinese)
- [8] 孙韶杰, 吴琼, 李国辉. 基于变分贝叶斯估计的相机抖动模糊图像的盲复原算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11): 2674-2679.
- SUN SH J, WU Q, LI G H. Blind image deconvolution algorithm for camera-shake deblurring based on variational Bayesian estimation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(11): 2674-2679. (in Chinese)
- [9] MANNOS J L, SAKRISON D J. The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1974, 4: 525-536.
- [10] NILL N B. A visual model weighted cosine transform for image compression and quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1985, 33(6): 551-557.
- [11] INGO H, LINA J K. Adaptive image coding with perceptual distortion control [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2002, 11(3): 213-222.
- [12] WATSON A B. Probability summation over time [J]. *Visual Research*, 1979, 19: 515-522.
- [13] ROBSON J G, GRAHAM N. Probability summation and regional variation in contrast sensitivity across the visual field [J]. *Vision Research*, 1981, 21(3): 409-418.
- [14] AHUMADA A J, PETERSON H A. Luminance-model-based DCT quantization for color image compression [C]. *Proc. Human Vision, Visual Processing, Digital Display III*, 1992: 365-374.
- [15] FOLEY J M, BOYNTON G M. A new model of human luminance pattern vision mechanisms: Analysis of the effects of pattern orientation, spatial phase and temporal frequency [C]. *Proc. SPIE*, 1994, 2054: 32-42.
- [16] FOLEY J M. Human luminance pattern-vision mechanisms: Masking experiments require a new model [J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, 1994, 11(6): 1710-1719.
- [17] WATSON A B. DCTune: A technique for visual optimization of DCT quantization matrices for individual images [C]. *Soc. Information Display Dig. Tech. Papers XXIV*, 1993: 946-949.
- [18] WATSON A B. Image data compression having

minimum perceptual error; U S, 5426512[P]. 1995.

- [19] SHEIKH H R, BOVIK A C, CORMACK L, *et al.*. LIVE image quality assessment database[DB/OL]. [2013] <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [20] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. No-reference image quality assessment in the spa-

tial domain [J]. *IEEE Trans. Image Process*, 2012, 21(12): 4695-4708.

- [21] MOORTHY A K, BOVIK A C. A two-step framework for constructing blind image quality indices [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(5): 513-516.

作者简介:



杨亚威(1986—),男,河南民权人,博士研究生,2008年、2010年于第二炮兵工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事图像处理、图像复原和目标识别及跟踪等方面的研究。E-mail: 13484468703@163.com

导师简介:



李俊山(1956—),男,陕西白水人,教授,博士生导师,1982于国防科技大学获得学士学位,1988年于第二炮兵工程学院获得硕士学位,2001年于西安微电子技术研究所获得博士学位,主要从事图像处理与目标感知识别,指挥信息系统建模与仿真等方面的研究。E-mail: lijunshan403@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)