

文章编号 1004-924X(2011)10-2485-09

基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价

范媛媛^{1,2,3}, 沈湘衡^{1*}, 桑英军³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 淮阴工学院, 江苏 淮安 223003)

摘要:提出一种基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价方法,用于评价光测设备无参考电视图像的清晰度。首先通过低通滤波器构造原始图像的参考图像,并对两者进行离散余弦变换(DCT),其次将变换后的中频系数和低频系数各分为高低两档后进行离散余弦反变换处理得到各自子图像,然后计算相应子图像的结构相似度 SSIM,最后将各子图像结构相似度加权求和得到图像的清晰度;为体现对比度敏感度函数(CSF)特性,权值设为该频带内所有频率系数绝对值的均值。对 145 幅高斯模糊图像的评价结果显示,相关系数(CC)为 0.915 2, Spearman 等级相关系数(SROCC)为 0.907 9, 离出率(OR)为 0.034 5, 准确性、单调性、一致性较高,可以在序列离焦电视图像中快速准确地找出离焦量最小图像,且效果优于运用较广泛的调焦评价函数梯度能量函数等 4 种传统梯度评价函数;对于不同类型的电视模糊图像的评价结果更加符合人眼的视觉特性,可以满足对光测设备无参考电视图像清晰度评价的要求。

关键词:图像质量评价;无参考;对比度敏感度;人眼视觉系统;清晰度;结构相似度

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2485

No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity

FAN Yuan-yuan^{1,2,3}, SHEN Xiang-heng^{1*}, SANG Ying-jun³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China*)
* *Corresponding author, E-mail: shenxiangheng@yahoo.com.cn*

Abstract: A no reference image sharpness assessment method based on the property of Contrast Sensitivity Function(CSF) was proposed to realize the sharpness assessment of optical measurement equipment without reference television images. Firstly, a reference image for an original was constructed by a low-pass filter and both images were performed the Discrete Cosine Transform(DCT), and intermediate frequency coefficients and high frequency coefficients are divided into two parts respectively to be performed the Inverse DCT(IDCT) to obtain sub-images. Then, the Structural Similarity(SSIM) of corresponding sub-images was calculated. Finally, the image sharpness is obtained through the weighted sum of sub-image structural similarities. The experiment results show that the proposed method can obtain the Pearson Correlation Coefficient(CC) in 0.915 2, Spearman Rank Order Correlation Coefficient CC(SROCC) in 0.907 9 and out Rate(OR) in 0.034

收稿日期:2011-01-07;修订日期:2011-02-19.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA7034320B)

5, which shows very high accuracy, monotonicity and consistency for the Gaussian blur image. The smallest defocus image can be quickly and accurately identified in the sequence defocus images and the effect is better than those of other four traditional focus evaluation functions. For different types of television blur images, the assessment results is more accord with human visual characteristics. It can be applied to optical measurement equipment television system and give accurate and reliable sharpness assessment of no reference television image.

Key words: image quality assessment; no reference; contrast sensitivity; human visual system; sharpness; Structural Similarity(SSIM)

1 引言

电视测量是光电测量设备的主要探测手段之一,电视图像质量好坏是电视系统的一个重要战术技术指标,同时图像质量评价也是图像工程基础性的研究内容,具有非常重要的意义^[1]。一幅数字图像质量的好坏与其清晰度直接相关,清晰度也指模糊度或粗糙度,是指人眼能感觉出的相邻影像间的明显程度。导致图像清晰度下降的原因是图像模糊,在图像的采集、传输、压缩和滤波等各种处理过程中都可能产生模糊,比如曝光期间成像系统和被摄物体相对运动产生的运动模糊,成像系统聚焦不良或部分景物处于散焦状态产生的离焦模糊等等,因此评价图像的清晰度应作为图像质量评价的一个重要环节,并可作为一个质量参数融入图像的综合质量评价系统中。

在靶场测量等的光测成像系统中,获取清晰的图像是进行高精度测量的必要条件。目前,常见的清晰度评价方法主要有梯度函数法、频谱函数法、熵函数法等^[2-4]。由于实际的光测设备电视系统中,基本获取不到参考或原始图像,因而无参考图像质量评价(no reference image quality assessment)对电视图像更具有实际意义。由于没有原始图像的任何信息可以参考,构造无参考的图像质量评价方法比全参考和半参考评价方法要困难得多,近年来无参考的图像质量评价方法研究取得了一些成果,但都不具有普遍性,仅是针对某些特定的失真类型^[5-7],且这些方法彼此独立,没有形成一套完善的大家公认的研究体系。

叶盛楠等^[8]指出不同的频率成分在图像结构形成中起不同作用,低频成分形成图像的基本灰度等级对图像内容或结构的决定作用较小;中频成分形成图像的主要边缘,决定了图像的基本结构;高频成分形成图像的次要边缘和细节,是对图

像基本结构的进一步补充细化。此外,各频率成分的视觉敏感程度与其能量有一定关系。经过相关实验分析,作者认为图像的清晰度与低频成分无关,由能量足够大中高频成分决定,且中频成分的影响权重更大。其中,设定频率阈值和能量阈值,频率和能量均大于设定阈值的频率系数为中频成分,频率大于设定频率阈值而能量小于设定能量阈值的频率系数为高频成分。

大量研究表明考虑人眼视觉系统(Human Visual System, HVS)特性的评价方法比没有考虑 HVS 的评价方法效果要好^[9]。因此,本文针对电视模糊图像,通过分析 HVS 的对比度敏感度函数(Contrast Sensitivity Function, CSF)特性,提出一种基于 CSF 特性的无参考图像清晰度评价方法(CSFNRS):首先原始图像通过低通滤波器来构造参考图像,对两图像分别进行离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT);其次根据设置的频率阈值和能量阈值,将变换后的中频系数和高频系数各分为高低两档,并进行 IDCT 得到各自子图像,然后利用结构相似度(Structural Similarity, SSIM)计算相应子图像的结构相似度,最后将各子图像结构相似度加权求和得到图像的清晰度。为体现 CSF 特性,权值设为该频带内所有频率系数绝对值的均值。实验证明该方法评价结果准确性、单调性、一致性很好,可以在序列离焦电视图像中快速准确的找到离焦量最小的图像,对于不同类型模糊图像的评价结果更加接近于人眼的视觉特性,可以应用于光测设备电视系统中对电视图像清晰度进行有效并可靠的评价。

2 CSF 和 SSIM

2.1 对比度敏感度

HVS 对图像中不同频率成分的敏感程度不

同,这一特性就是对比度敏感度,不同实验所得的 CSF 函数形式虽有不同,但基本上都认为 CSF 是空间频率的函数,具有带滤波器的性质,在中频段敏感度很强,而高低频段敏感度降低。常用的 CSF 函数是由 Mannos 和 Sakrison^[10] 提出的,具体形式如下:

$$A(f) = 2.6 \times (0.0192 + 0.114f) \exp(-(0.114f)^{1.1}), \quad (1)$$

其中,空间频率 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ (周期/度), f_x, f_y 为水平、垂直方向的空间频率。将 f 归一化到 $[0, 0.5]$, 可得 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 $[0.03, 0.25]$ 处,对比度最敏感,在低频和高频处,敏感度明显下降。

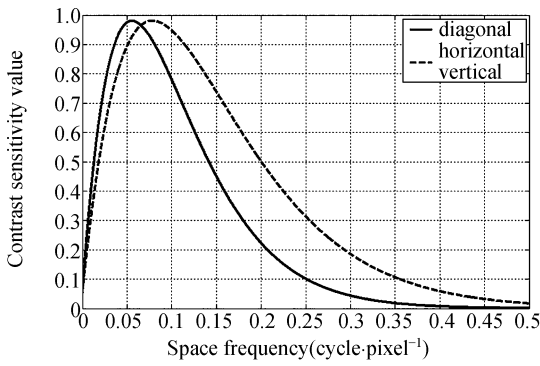


图 1 CSF 特性曲线

Fig. 1 CSF characteristic curve

2.2 结构相似度

Zhou Wang 等^[11-12] 认为 HVS 的主要功能是提取视场中的结构信息,而不是图像像素点间的误差,结构失真才是图像质量评价中至关重要的因素,并因此提出了基于结构相似性理论和结构相似度。SSIM 将图像分成亮度 l 、对比度 c 、结构 s 三部分并分别进行比较,然后加权乘积获得 SSIM 值。具体计算公式如下:

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma, \quad (2)$$

$$\begin{cases} l(x, y) = \frac{2u_x u_y + C_1}{u_x^2 + u_y^2 + C_1} \\ c(x, y) = \frac{2\sigma_x \sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \\ s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x \sigma_y + C_3} \end{cases},$$

其中, u_x, u_y 为参考图像和待评价图像亮度均值, σ_x, σ_y 为标准差, σ_{xy} 为协方差。 C_1, C_2, C_3 均为常

数,防止分母接近零时产生不稳定现象。当取 $\alpha = \beta = \gamma, C_3 = C_2/2$ 时, (2) 式可简化为:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2u_x u_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(u_x^2 + u_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}. \quad (3)$$

在评价图像质量时,用 8×8 的窗口逐像素在原始图像和待评价图像上移动,计算窗口对应子图像的 SSIM 值,并对所有 SSIM 值求平均,便可得到整幅图像的 SSIM 值:

$$MSSIM = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M SSIM(x_i, y_i). \quad (4)$$

SSIM 对静态图像的质量评价取得了较好的效果,与主观评价比较一致,但是这种方法对于模糊图像的敏感程度较低,评价不够理想,尤其是模糊程度比较大的,评价结果与人眼视觉特性非常不符。针对 SSIM 存在的问题,杨春玲等^[13] 提出了基于梯度信息的结构相似度 GSSIM,王宇庆等^[14] 提出了一种基于局部方差和结构相似度的图像质量评价方法。

前面提到,图像的清晰度与低频成分无关,由能量足够大中高频成分决定,且中频成分的影响权重更大,结合 CSF 特性和 SSIM,可以通过分别衡量图像的中高频成分的多少,然后加权求和来评价图像清晰度。由于图像低频成分对清晰度影响很小,可以对原始图像低通滤波来获取原始图像的参考图像。清晰图像比模糊图像包含更多中高频成分,因此清晰图像低通滤波后丢失的成分会更多,与参考图像的结构相似度就更小,而模糊图像则刚好相反。

3 基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价

评价方法的系统框架如图 2 所示。具体过程如下:

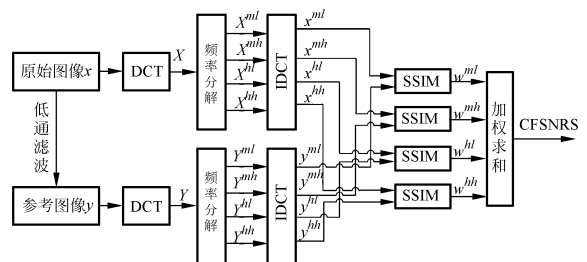


图 2 评价方法系统框图

Fig. 2 Block diagram of assessment algorithm

3.1 构造参考图像

现阶段我们只分析电视灰度图像,彩色图像清晰度评价是下一步重点研究的课题。因此对于输入的待评价图像,如果是彩色图像,可先对其进行色彩空间转换,提取亮度分量 x 。然后对灰度图像 x 进行低通滤波得到参考图像 $y, y = LPF(x)$ 。实验表明^[7],基于高斯模型的平滑滤波器可以取得较好的效果,因此本文中采用高斯平滑滤波器,而非理想滤波器,这样原始图像经低通滤波后的参考图像还保留一小部分中高频成分。

3.2 离散余弦变换

对原始图像 x 和参考图像 y 分别进行离散余弦变换得到两图像的频率系数 X 和 Y 。图 3 为图像 Bikes 及其 DCT 变换情况。图像经过 DCT 变换后,低频分量都集中在左上角,高频分量都集中在右下角,其中第一行第一列的元素代表了直流分量。

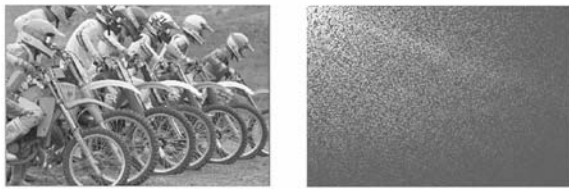


图 3 Bikes 及其 DCT 变换
Fig. 3 Bikes and its DCT

3.3 频率分解

为表现 HVS 的 CSF 特性,根据设置的频率阈值和能量阈值,将中频系数和高频系数各分为高低两档,即将变换后的频率系数 X 去除低频分量后,分解为中频的结构信息系数 X^{ml}, X^{mh} 和高频的次要细节系数 X^{hl}, X^{hh} ,将变换后的频率系数 Y 去除低频分量后,分解为中频系数 Y^{ml}, Y^{mh} 和高频系数 Y^{hl}, Y^{hh} 。

分类原则:对于频率系数矩阵 X 中任意一点 (u, v) ,设 $D_x(u, v)$ 为点 (u, v) 到 DCT 系数矩阵左上角的距离, $A_x(u, v)$ 为 $X(u, v)$ 的绝对值,频率阈值为 f ,能量阈值 A_1, A_2, A_3 。

- (1)若 $D_x(u, v) > f$ 且 $A_x(u, v) > A_1$,则 $X(u, v) \in X^{ml}$ 。
- (2)若 $D_x(u, v) > f$ 且 $A_2 < A_x(u, v) > A_1$,则 $X(u, v) \in X^{mh}$ 。
- (3)若 $D_x(u, v) > f$ 且 $A_3 < A_x(u, v) > A_2$,则 $X(u, v) \in X^{hl}$ 。

(4)若 $D_x(u, v) > f$ 且 $A_x(u, v) > A_3$,则 $X(u, v) \in X^{hh}$ 。

同理,将参考图像的频率系数矩阵 Y 分为中频系数 Y^{ml}, Y^{mh} 和高系数 Y^{hl}, Y^{hh} 。

3.4 离散余弦反变换

对原始图像的中频系数 X^{ml}, X^{mh} 和高频系数 X^{hl}, X^{hh} 分别进行离散余弦反变换,得到原始图像的中频子图像 x^{ml}, x^{mh} 和高频子图像 x^{hl}, x^{hh} ;同理,对参考图像的中频系数 Y^{ml}, Y^{mh} 和高频系数 Y^{hl}, Y^{hh} 分别进行离散余弦反变换,得到参考图像的中频子图像 y^{ml} 和 y^{mh} 高频子图像 y^{hl}, y^{hh} 。图 4 为 Womanhat 及其各子带图像。

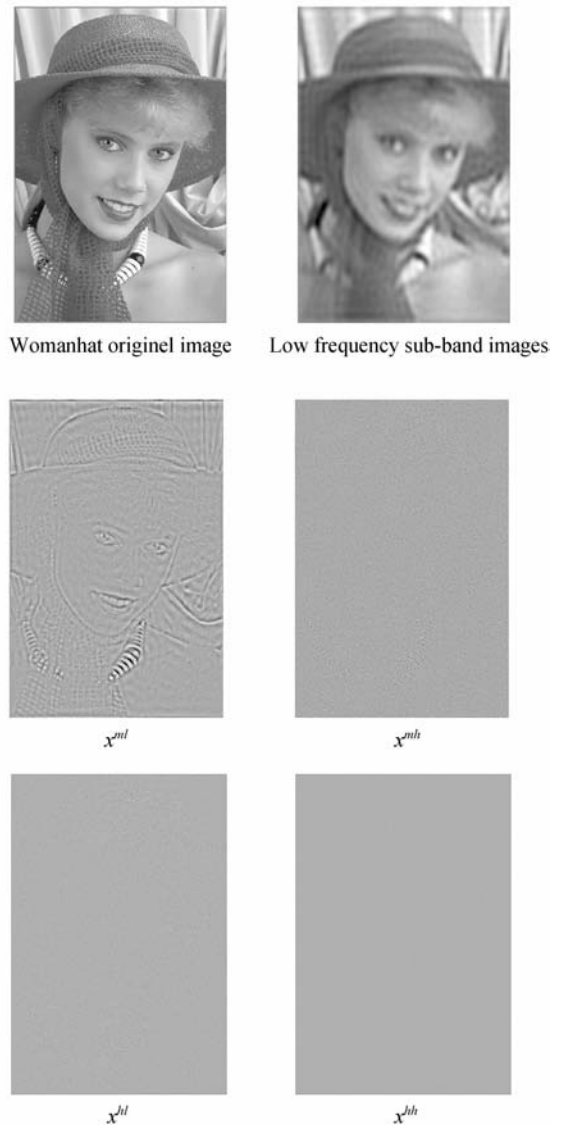


图 4 Womanhat 及其各子带图像
Fig. 4 Womanhat and its sub-band images

3.5 计算各子带图像的结构相似度

利用式(2)和(4)计算原始图像与参考图像的中、高频子图像结构相似度 $SSIM^{ml}$, $SSIM^{mh}$ 和 $SSIM^{hl}$, $SSIM^{hh}$ 。

3.6 计算对比度敏感度无参考图像清晰度

将 $SSIM^{ml}$, $SSIM^{mh}$ 和 $SSIM^{hl}$, $SSIM^{hh}$ 加权求和,得到的是模糊度,然后用 1 减去模糊度得到的就是清晰度。具体计算公式如式(5)。

$$CSFNRS = 1 - (\omega^{ml} \times SSIM^{ml} + \omega^{mh} \times SSIM^{mh} + \omega^{hl} \times SSIM^{hl} + \omega^{hh} \times SSIM^{hh}), \quad (5)$$

其中 ω^{ml} , ω^{mh} , ω^{hl} , ω^{hh} 为加权系数。根据 HVS 的 CSF 特性,中频成分视觉敏感性大于高频成分,所以应赋予 ω^{ml} 最大权值, ω^{mh} , ω^{hl} 次之, ω^{hh} 最小。为了体现 HVS 的 CSF 特性,这里我们设定每个子带的权值为该频带内所有频率系数绝对值 $A_x(u, v)$ 的均值,即:

$$\omega(i)' = \frac{\sum A_{w(i)}(u, v)}{n}, \quad (6)$$

其中, n 为该频带内包含的 DCT 系数的个数,对各个频带的权值作归一化处理,得到:

$$\omega(i) = \frac{\omega(i)'}{\sum_i \omega(i)'}. \quad (7)$$

4 评价结果及分析

为了验证本文提出的对比度敏感度无参考清晰度评价方法的有效性,实验包括三个部分:实验 1 从准确性、单调性、一致性来验证 CSFNRS 的有效性,并与传统的客观评价方法 MSE、PSNR 以及 SSIM 进行比较;实验 2 为 CSFNRS 与常用的四个清晰度评价函数即梯度能量函数、方差函数、Roberts 梯度函数、Laplacian 梯度函数进行比较分析,实验 3 针对不同类型的模糊图像对 CSFNRS 进行有效性分析。

在以下三个实验中,SSIM 的所有参数设置同文献[12],即:

$$\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 2, k_1 = 0.01, k_2 = 0.03, l = 255,$$

$$C_1 = (k_1 \times l)^2, C_2 = (k_2 \times l)^2, C_3 = C_2 / 2;$$

CSFNRS 中, $\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 6, C_1, C_2, C_3$ 与 SSIM 相同, $A_1 = 30, A_2 = 15, A_3 = 5, f = 0.1 \times \sqrt{mn}$ (其中 m, n 为图像的长和宽)。低通滤波器选用 7×7 大小且 $\alpha^2 = 9$ 的高斯平滑滤波器,所给出的这些

参数值均为经验值,是经过大量的实验分析比较得到的效果最佳的典型值。

4.1 实验 1 结果及分析

实验 1 中图像采用美国 TEXAS 大学图像视频工程实验室提供的 LIVE Database Release2 图像库[15]中 29 幅原始图像及 Gaussian blur 的 145 幅高斯模糊图像。该库还给出了每幅图像的差分平均主观评价值 (Difference Mean Opinion Score, DMOS), DMOS 值由观测者给出的原始质量分处理后得到, DMOS 值越小,图像主观质量越好。将 RGB 图像转换到 YCrCb 空间后保留亮度 Y 分量。

为了定量分析各图象质量评价模型,文中采用最小二乘法将 MSE、PSNR 以及 SSIM 和 CSFNRS 各客观评价方法的评价结果与 DMOS 进行曲线拟合,图 5 为四种客观图像质量评价值与 DMOS 的散点图以及曲线拟合情况。由图 5 得出,针对 Gaussian blur 图像,CSFNRS 与主观评价值存在比非常好的线性关系,各点比较集中于所拟合曲线;较 MSE 及 PSNR, CSFNRS 评价效果更好,与 SSIM 评价效果相差不大。

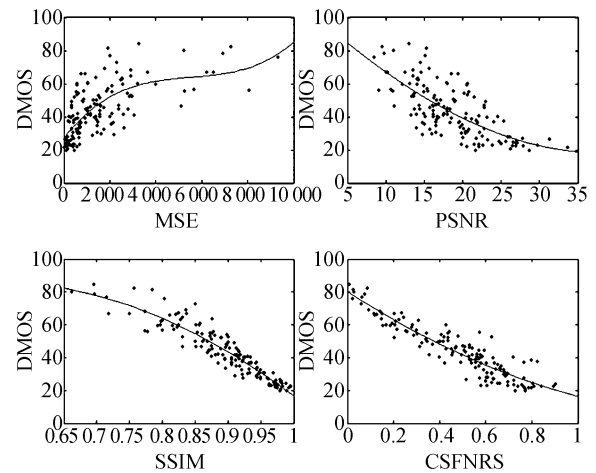


图 5 4 种图像质量评价值与 DMOS 的散点图
Fig. 5 Plots of four kinds of assessment value and DMOS

一个实用的评价指标应满足下列判定准则[16]: 预测的准确性、单调性、一致性。按照 VQEG 对模型的检验标准,选用五个参数指标比较评价方法:用非线性拟合后的清晰度预测值 CSFNRS 和 DMOS 间的线性相关系数 Pearson 相关系数(CC)、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)作为预测评价方法准确性的量度;

用 Spearman 等级相关系数(SROCC)作为预测评价模型单调性的量度;用离出率(OR)作为模型预测一致性的量度。

表 1 列出了针对 LIVE Database Release2 图像库中的 29 幅原始图像及 Gaussian blur 的 145 幅高斯模糊图像,四种客观评价方法评价结果与 DMOS 五个参数指标值。可以看出 CSFNRS 评价方法 CC 达到了 0.915 2, SROCC 达到了 0.907 9,OR 只有 0.034 5,主客观评价非常吻合;五种评价指标都远远优于 MSE 和 PSNR,比 SSIM 相对差一些,但是 SSIM 是全参考评价方法,本文提出的是无参考评价方法,由于没有原始图像的任何信息可以利用,所以构造无参考的图像质量评价方法比全参考和半参考评价方法要难得多,鉴于此,本文提出的清晰度评价方法评价效果较好,符合人眼的视觉特性和主观感受。对于施加不同程度高斯模糊的单幅图像,本文方法 CC 达到了 0.999 9,SROCC 为 1,评价效果与人眼的主观感受基本一致。

表 1 4 种评价方法 5 个参数指标值

Tab.1 Five parameter indicators value of assessment methods

参数指标	评价方法			
	MSE	PSNR	SSIM	CSFNRS
CC	0.707 4	0.720 5	0.940 8	0.915 2
SROCC	0.702 7	0.714 7	0.949 4	0.907 9
OR	0.062 1	0.048 3	0.062 1	0.034 5
MAE	8.914 7	8.648 0	4.060 3	5.188 4
RMSE	11.113 4	10.903 2	5.003 4	6.336 8

4.2 实验 2 结果及分析

自动准确聚焦是获得清晰图像的关键,目前有些人在图像自动调焦领域做了很多研究工作^[17-18],而图像清晰度评价函数在基于图像处理的自动调焦技术中起着关键的作用^[19]。实验 2 对 CSFNRS 与运用较广泛的调焦评价函数梯度能量函数、方差函数,Roberts 梯度函数、Laplacian 梯度函数进行比较分析。实验 2 中图像,我们用可调焦的加拿大 Mega Speed 公司生产的高速摄像机 MS50K 连续拍摄了一系列 BMP 图像,并从中挑选了 33 幅,分辨率设置为 512×512,在拍摄过程中连续调节镜头的焦距,使获取的图像从最大离焦状态逐渐调节到聚焦状态,再到离焦最大。计算这 33 幅图像的 CSFNRS 值和另外四

种评价函数值,为了便于比较分析,将各评价值进行了归一化处理。图 6 为 33 幅图像中的其中 4 幅典型状态,5 种清晰度评价方法对比情况如图 7 所示。

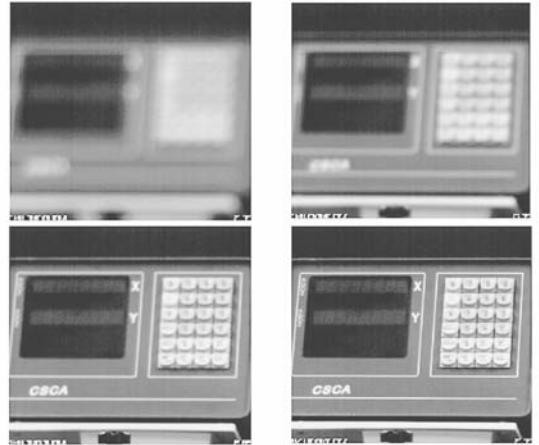


图 6 调焦图像的 4 种典型状态

Fig.6 Four typical states of focus images

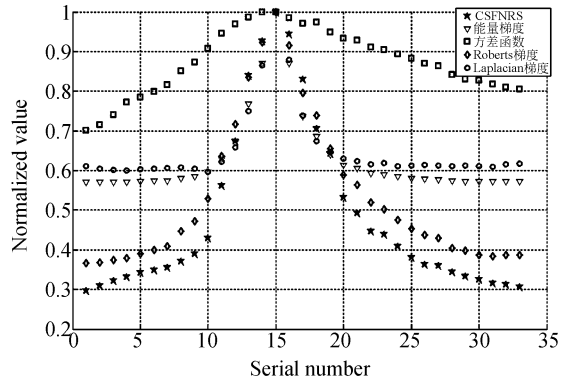


图 7 5 种清晰度评价方法对比图

Fig.7 Comparison chart of five sharpness assessment methods

一个好的调焦评价函数除了能够适应更多类型图像的清晰度评价,同时应该能够满足在焦平面两侧斜率尽量大和值域尽量大两个条件,以便快速准确地序列离焦图像中找出离焦量最小、最清晰的一幅图像。由图 7 可以得出以下结论:五种评价函数中,CSFNRS 评价函数在离焦—聚焦—离焦的整个范围内,都有较大的斜率,具有最好的单调性,并且值域也是最大的,这样便于在焦点左右足够大范围内都能很好地完成对焦状态的搜索定位,聚焦快速准确,效果明显优于其它四种

传统梯度评价函数;另外只有 CSFNRS 的输出结果是有界的,在 $[0, 1]$ 区间,这样可以根据评价值对不同内容、不同清晰度的图像进行比较,而四种梯度函数的输出值是无界的,不仅依赖于图像清晰程度,跟图像场景中的纹理信息也密切相关,纹理丰富的图像评价价值会更大,不利于对不同内容图像进行比较分析。

4.3 实验 3 结果及分析

一个好的清晰度评价方法应该能够适应尽量多种类型的模糊图像,光测设备电视图像模糊类型主要有像移引起的横向模糊、离焦引起的纵向模糊、曝光不足或过度引起的模糊等,实验 3 验证本文评价方法对于以上不同模糊类型的有效性。实验 3 中图像同样用加拿大 Mega Speed 公司生产的高速摄像机 MS50K 拍摄的 BMP 图像,只是拍摄过程中的一些参数做了相应调整。如图 8 所示,为了与全参考评价方法 MSE、PSNR 和 SSIM 进行比较,从中找出最清晰的一幅即(a)作为参考图像,(b)和(c)为运动模糊图像,(d)和(e)为离焦模糊图像,(f)和(g)为在(d)的基础上改变曝光时间来调整图像的平均灰度值得到的。

从图 8 可以看出,根据人眼的主观感受,七幅图像中,由清晰到模糊的排列顺序依次是:adfgbec。根据 Lewis 和 Knowles^[20]提出的人眼灰度敏感性特性,人眼对不同灰度具有不同的敏感性,一般情况下对中等灰度敏感最佳,而对低灰度和高灰度敏感性下降,因此将(d)增加曝光时间得到的图像(f)灰度值偏高,而减小曝光时间得到的图像(g)灰度值偏低,使得图像的清晰度比(d)有所降低,其中图像(f)比图像(g)相对清晰,且它们都明显比运动模糊图像(b)清晰。

图像的主要特征和信息取决与它的边缘和局部细节,同时它们也是影响图像视觉质量的重要因素^[21]。由表 3 可以看出,MSE、PSNR、SSIM 在对同种类型模糊图像的评价结果还比较符合人类主观感受,但对于不同类型的模糊图像,评价效果很差,与人眼视觉特性明显不符;而 CSFNRS 更注重图像细节内容的完整性,比较全面地反映了图像的各种结构信息,因此对不同模糊类型图像的评价结果更加接近于人眼的视觉特性,与 MSE、PSNR 和 SSIM 相比评价效果更优。



(a)参考图像

(a) Reference image



(b)运动模糊图像 1

(b) Motion blur image 1



(c)运动模糊图像 2

(c) Motion blur image 2



(d)离焦模糊图像 1

(d) Defocus blur image 1



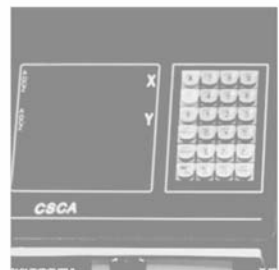
(e)离焦模糊图像 2

(e) Defocus blur image 2



(f)(d)增加曝光时间

(f) Adding exposure time of (d)



(g)(d)减小曝光时间

(g) Reducing exposure time of (d)

图 8 不同类型模糊图像

Fig. 8 Different types of blur images

表 3 不同类型模糊图像得分

Tab. 3 Scores of different types of blurred images

得分	MSE	PSNR	SSIM	CFSNRS
9(a)	0	∞	1	0.653 9
9(b)	1 996.517 4	15.128 1	0.680 4	0.574 1
9(c)	1 884.071 4	15.379 8	0.661 8	0.486 7
9(d)	66.868 3	29.878 6	0.929 5	0.620 8
9(e)	525.378 8	20.926 1	0.792 2	0.500 8
9(f)	3 726.273 0	12.418 1	0.518 1	0.612 8
9(g)	1 661.103 6	15.926 8	0.459 0	0.596 6

5 结 论

由于实际的光测设备电视系统基本获取不到参考或原始图像,为了实现对光测设备无参考电视图像清晰度的评价,本文在研究 CSF、SSIM 和

DCT 特点的基础上,提出并实现了一种基于 CSF 的图像清晰度的无参考质量评价方法,并通过 3 个实验对所提方法进行了有效性验证。实验结果表明,对于 LIVE Database Release2 图像库中 145 幅 Gaussian blur 图像,CC 为 0.915 2, SROCC 为 0.907 9,OR 为 0.034 5,评价结果有着很高的准确性、单调性、一致性。该方法可以在序列离焦电视图像中快速准确的找到离焦量最小的一幅,且效果优于能量梯度函数等 4 种传统梯度评价函数,具有更高的调焦精度和调焦效率;对于不同模糊类型的图像的评价结果更加接近于人眼的视觉特性,与 MSE、PSNR 和 SSIM 相比更加完善,评价效果更优。该方法可以应用于光测设备电视系统测量中,对电视图像清晰度进行有效并可靠的评价。

参考文献:

- [1] SHEIKH H R. Image quality assessment using natural scene statistics[D]. Austin: The University of Texas, 2004.
- [2] NG KUANG CHEM, AUN NEOW POO, MARCELO H, *et al.*. Practical issues in pixel-based autofocusing for machine vision[C]. Seoul, Korea: Proceedings of the 2001 IEEE, International Conference on Robotics and Automation, 2001: 2791-2796.
- [3] 赵辉, 鲍歌堂, 陶卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 531-536.
ZHAO H, BAO G T, TAO W. Experimental research and analysis of automatic focusing function for image measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 531-536. (in Chinese)
- [4] 朱铮涛, 黎绍发, 陈华平. 基于图像熵的自动聚焦函数研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 537-542.
ZHU ZH T, LI SH F, CHEN H P. Research on auto-focused function based on the image entropy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 537-542. (in Chinese)
- [5] MARZILIANO P, DUFAUX F, WINKLER S, *et al.*. Perceptual blur and ringing metrics: Application to JPEG2000[J]. *Sigman Processing: Image Communication*, 2004, 19(2): 163-172.
- [6] ONG E, LIN W, LU Z, *et al.*. No-reference quality metric for measuring image blur[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2003: 467-472.
- [7] 谢小甫, 周进, 吴钦章. 一种针对图像模糊的无参考质量评价指标[J]. 计算机应用, 2010, 30(4): 921-924.
XIE X F, ZHOU J, WU Q ZH. No-reference quality index for image blur[J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(4): 921-924. (in Chinese)
- [8] 叶盛楠, 苏开娜, 肖创柏, 等. 基于结构信息提取的图像质量评价[J]. 电子学报, 2008, 36(5): 856-861.
YE SH N, SU K N, XIAO CH B, *et al.*. Image quality assessment based on structural information extraction[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(5): 856-861. (in Chinese)
- [9] 汪孔桥. 数字图像的质量评价[J]. 测控技术, 2000, 19(5): 14-16.
WANG K Q. Quality assessment of digital[J]. *Images Measurment & Control Technology*, 2000, 19(5): 14-16. (in Chinese)
- [10] MANNOS J L, SAKRISON D J. The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1974, 20(4): 525-536.
- [11] WANG ZH, BOVIK A C. A universal image quality index [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, 9(3): 81-84.
- [12] WANG ZH, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.*. Image quality assessment; from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on*

Image Processing, 2004, 13(4):600-612.

- [13] 杨春玲,陈冠豪,谢胜利. 基于梯度信息的图像质量评判方法的研究[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1313-1317.
YANG CH L, CHEN G H, XIE SH L. Gradient information based image quality assessment [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(7): 1313-1317. (in Chinese)
- [14] 王宇庆,刘维亚,王勇. 一种基于局部方差和结构相似度的图像质量评价方法[J]. 光电子·激光, 2008, 19(11):1546-1553.
WANG Y Q, LIU W Y, WANG Y. Image quality assessment based on local variance and structure similarity[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(11): 1546-1553. (in Chinese)
- [15] SHEIKH H, WANG Z, CORMACK L, et al.. LIVE image quality assessment database, release2[EB/OL]. (2008-03-21) [2008-08-27]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [16] WANG Z, SHEIKH H R, BOVIK A C. *Objective Video Quality Assessment* [M]. The Handbook of Video Database: Design and Application, B. Furht, O. Marqure ed., CRC Press, 2003:1041-1078.
- [17] 王倩,宋恩民,许向阳,等. 基于加权邻域相关性的显微镜自动聚焦函数[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1):166-171.
WANG Q, SONG EN M, XU X Y, et al.. Auto-focusing function for microscope image based on weighted neighborhood correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):166-171. (in Chinese)
- [18] 梁敏华,吴志勇,陈涛. 采用最大灰度梯度法实现经纬仪自动调焦控制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12):3016:3021.
LIANG M H, WU ZH Y, CHEN T. Auto-focusing adjustment of theodolites by largest the gradient method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):3016:3021. (in Chinese)
- [19] 陈国金,朱妙芬,张克松. 图像调焦过程的清晰度评价函数研究[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(2): 165-169.
CHEN G J, ZHU M F, ZHANG K S. Image definition evaluation function in auto-focusing process [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, 24(2):165-169. (in Chinese)
- [20] LEWIS A S, KNOWLES G. Image compression using 2-D wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1992, 1(2): 244-250.
- [21] 王光新,王正明,谢美华,等. 泊松噪声模糊图像的边缘保持变分复原算法[J]. 光电子·激光, 2007, 18(3):359-363.
WANG G X, WANG ZH M, XIE M H, et al.. An edge-preserving variational restoration method of blurred image corrupted by poisson noise [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(3): 359-363. (in Chinese)

作者简介:



范媛媛(1979—),女,山东邹城人,博士研究生,2003年于烟台师范学院获得学士学位,2006年于烟台大学获得硕士学位,主要从事图像处理及图像质量评价方面的研究。E-mail: fyuanyuan123@163.com



桑英军(1980—),男,山东莱州人,博士研究生,2003年于烟台师范学院获得学士学位,2007年于长春工业大学获得硕士学位,主要从事电能质量分析与控制及电力电子技术方面的研究。E-mail: sangyingj@163.com

导师简介:



沈湘衡(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1977年于吉林工业大学获得学士学位,主要从事光电测量设备精密检测技术和方法方面的研究。E-mail: shenxiangleheng@yahoo.com.cn