基于色彩相关性的彩色图像清晰度评价算法

郭惠楠[1],曹剑中[1],周祚峰[1],唐利孬[1],王 华[1],马 楠[2]

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119;
2. 中国人民解放军 95879 部队,四川 成都 610081)

摘 要:数字图像的清晰度评价对于相机自动对焦而言至关重要。针对现有清晰度评价函数的不足之处,提出了一种针对彩色数字图像的空域清晰度评价算法。此算法利用像素三刺激值之间的色差相关性判定像素点的色彩,建立清晰度色差因子;运用非线性函数提高了像素点的梯度增益系数,使该评价函数对特殊条件下图像的清晰度判定更敏感。实验证明,该评价函数在评价一般自然图像清晰度时比传统评价算法更为敏感;在典型评价函数评价特殊目标图像失效时,该算法依然具有良好的鲁棒性;此算法计算量较小,执行效率高,易于硬件实现。

关键词:图像清晰度; 自动对焦; 色彩相关性; 评价函数; 梯度

中图分类号:TP311.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)11-3132-05

Image definition evaluation algorithm based on color relativity

Guo Huinan[1], Cao Jianzhong[1], Zhou Zuofeng[1], Tang Linao[1], Wang Hua[1], Ma Nan[2]

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. People's Liberation Army of No.95879, Chengdu 610081, China)

Abstract: Definition evaluation function of digital image plays an important role in digital camera auto-focus. Due to the existing definition evaluation functions are of some marked disadvantages, a spatial domain evaluation algorithm for digital color image was proposed. The colorful property of each pixel was judged and definition chromatic difference parameters was created by using chromatic difference between their tri-stimulus values. Besides, nonlinear function was used to improve the gradient coefficient of each pixel which made the evaluation function be more sensitive to some images in extreme cases. Experimental results show the superiority of our algorithm over the most of existing evaluation algorithms in dealing with natural images. And our method also is of a good ability of robustness as well as reducing calculation complexity and it can be easily achieved on hardware.

Key words: image definition; auto focus; color relativity; evaluation function; gradient

收稿日期:2013-03-08; **修订日期**:2013-04-17

基金项目:国家自然科学基金(No.61201376)

作者简介:郭惠楠(1985-),男,博士生,主要从事图像与视频信息处理方面的研究。Email:s09068@opt.cn

导师简介:曹剑中(1969-),男,研究员,博士生导师,主要从事航空相机成像系统方面的工作。Email:cjz@opt.ac.cn

0 引 言

相机的自动对焦功能(Auto Focus-AF)对于现代数字成像设备而言有着重要的意义。为了快速获取场景的实时信息，人们总希望相机能够稳定而准确地捕获目标物的清晰图像。清晰度是评判图像品质的重要指标，它表征了图像细节纹理等方面的清晰程度[1]。

随着数字信号处理技术的发展,人们在空域、时域等多方面展开了图像清晰度的研究[2-4]。图像的清晰度被近似看作图像细节的保真程度。边缘细节保留的越多，图像灰度的变化越敏锐，图像越清晰[5-6]。目前主要算法有基于空域的梯度函数算法[3,5,7]、边缘锐度算法[5]、Tenengrad 函数算法[3]以及 Brenner 函数算法[4];基于频域的傅里叶变换算法[3]、小波变换判定算法等[7];基于图像信息熵函数的评价算法。基于频域变换以及信息熵函数的评价算法虽然对不同场景下图像清晰度评判有着较高的鲁棒性，但此类算法往往涉及较大的运算量以及复杂的变换公式,因此难于硬件实现。然而,基于空域的算法计算量较小、算法复杂度较低、易于硬件实现,因此广泛应用于工程实际当中。

1 典型的图像清晰度评价算法

在空域内，典型的图像清晰度评价函数大多针对目标物的细节边缘进行检测、分析,利用边缘梯度函数值判定图像的清晰程度。

1.1 边缘锐度评判函数

基于边缘锐度 (Edge Acutance Value -EAV)的评价函数,通过遍历图像中的每一个像素点,计算其周围 8 个方向的灰度梯度，并按相对距离求加权平均值,得到整幅图像的边缘锐度评判值[6]。

1.2 能量梯度评判函数

能量梯度函数 (Gradient Evaluation Function-GEF)关注像素点水平与垂直方向的梯度变化,计算参考点的水平梯度与垂直梯度的平方值并求和。最后以全图的梯度平方和作为评价值[1,3]。

1.3 Brenner 评判函数

Brenner 评判函数 (Brenner Evaluation Function-BEF)只是计算相差两个单位的两个像素的灰级差的平方值,计算全图后得到评价函数值[4]。

典型的图像清晰度评价函数在评价灰度图像时,对于边缘细节较为灵敏。如图 1,2 所示,图 1 为不同清晰度的典型实验 Lena 图像,图 2 为输入图像序列的清晰度评价的实验结果)。EAV 评价函数对图像细节多方向的梯度变化都有着较为准确的判别;GEF 算法复杂度较低，能够快速描述水平和垂直两个方向的梯度变化;BEF 算法利用了间隔像素的梯度差,使得对于边缘信息更敏感。然而,对于处理彩色图像,现有算法往往将 RGB 三维色彩空间转换至一维灰度空间,这就造成了图像色彩信息的丢失;并且，以上算法没有考虑到目标物与背景色彩的相关性,以致某些特定场合中,无法准确评价目标图像的清晰度。

图 1 标准实验图

Fig.1 Standard image

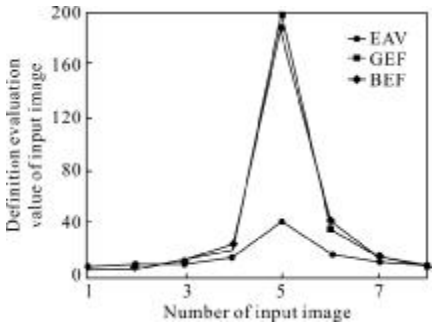

图 2 Lena 图像的不同算法实验结果对比

Fig.2 Contrast experimental results of different evaluation algorithms of Lena image

2 基于色彩相关性的彩色图像清晰度评价算法

根据数字图像处理相关理论，图像中高频能量表达了图像轮廓锐度和细节丰富度，而低频和中频段能量表述了连续平缓的图像变化。并且高频能量所占比例较小，低频部分所占总能量比例较大[4]。因此，笔者依然沿用边缘细节的梯度变化来描述图像的轮廓边缘。这里，设评价函数为 $\mathbf{F}(\mathbf{I})$，则

$$\mathbf{F}(\mathbf{I})=f(\nabla) \tag{1}$$

式中：$f(\nabla)$表示关于梯度∇的函数。

对于一幅彩色图像，设其原始输入图像在 RGB 色彩空间中描述。根据实际需求，将其变换至其他色彩空间 Γ_{ijk}(如 HSI 色彩空间或 YCbCr 色彩空间)。

$$\Gamma(\mathbf{x},\mathbf{y})_{ijk}=\mathbf{T}[(\mathbf{m},\mathbf{n})_{RGB}] \tag{2}$$

设 Γ_{ijk} 其中一维 Γ_i 分量表示图像的亮度分量，则上述公式(1)中梯度∇_{xy}可表述为

$$\nabla_{xy}=[\Gamma_i(\mathbf{x}+1,\mathbf{y})-\Gamma_i(\mathbf{x},\mathbf{y})]^2 \tag{3}$$

由于色彩相关性的影响，RGB 色彩空间到 Γ_{ijk} 色彩空间的变换中 Γ_i 可表述为：

$$\Gamma_i=t_1\mathbf{R}+t_2\mathbf{G}+t_3\mathbf{B} \quad (t_x\neq 0,\ x=1,2,3) \tag{4}$$

式中：t_1,t_2,t_3 为变换系数，且确定的 Γ_i 可由不同的 **R**、**G**、**B** 线性表示。这表明当选取 Γ_i 作梯度计算时，不同颜色的像素间的梯度差可能相同；并且，在一幅清晰的彩色图像内，不同色彩的像素边缘处，可能其梯度$\nabla=0$。此时，运用现有的典型评价函数判定图像清晰度时效果不理想，甚至出现失效的情况。

如图 3 所示，图中分别标注了不同区域的 RGB 分量值。笔者以两种色彩空间变换为例，对比不同评

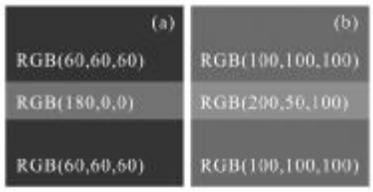

图 3 两种特殊色彩分布图像

Fig.3 Two kinds of images with special color distribution

价函数的评价效果。对于图 3(a)，将 RGB 色彩空间变换至 HSI 色彩空间，则亮度 I 分量描述为：

$$\mathrm{I}=\frac{\mathbf{R}+\mathbf{G}+\mathbf{B}}{3} \tag{5}$$

对于图 3(b)将 RGB 色彩空间变换至 YCbCr 色彩空间，亮度 **Y** 分量描述为：

$$\mathbf{Y}=0.299\mathbf{R}+0.587\mathbf{G}+0.114\mathbf{B} \tag{6}$$

对于以上两幅清晰的测试图像而言，测试结果如表 1 所示，两幅图像的清晰度评价值都几乎为 0，即评价失效。为了能够在不同色彩空间下分辨出细

表 1 现有算法对图 3 测试图像的清晰度评价值

Tab.1 Definition evaluation values of existing algorithms of two images in Fig.3

	Image	EAV	GEF	BEF
HSI	(a)	0	0	0
YCbCr	(b)	0.011	0.001	0.003

节边缘像素的色彩属性，在原有公式(1)的基础上加入了色差评价参数 δ，如公式(7)：

$$\mathbf{F}(\mathbf{I})=f(\nabla,\delta) \tag{7}$$

公式(7)中 δ 表征了参考像素点的色差情况。由于人眼视觉系统及成像设备对光谱中 550 nm 左右的绿色(G)光谱响应敏感[8]，因此选取像素点的 **G** 分量作为参考。以三刺激值方差描述色差评价参数 δ_{xy}：

$$\delta_{xy}=\sqrt{(\mathbf{R}_{xy}-\mathbf{G}_{xy})^2+(\mathbf{B}_{xy}-\mathbf{G}_{xy})^2} \tag{8}$$

式中：下标 **xy** 表示在点(**x**,**y**)处的分量值。

为了使所建立的评价函数对大多数图片有较强的鲁棒性，针对一些特殊环境下拍摄到的图像进行了清晰度评价准则的研究。对于大背景下小目标物的清晰度评价时，由于目标物边缘信息量相对较少，其所占像素梯度值总量相对偏低。因此，在评价清晰度不同的图像时，现有评价函数的评价值浮动较小，评价效果不理想。并且，当目标物与背景的色彩接近时，由于此时目标物边缘梯度信息与背景较为接近，即梯度值较小，这就使得不同图像的评价值差异较小，评价函数的灵敏度降低。为此，笔者对上述公式(3)的梯度分量作非线性放大处理。进一步改写公式(7)，

$$\mathbf{F}(\mathbf{I})=f(\alpha,\nabla,\delta) \tag{9}$$

式中：α 为非线性放大系数。

由于对数函数对微小信号有着较好的延展性，因此，设 α_{xy} 为参考像素(**x**,**y**)点的对数放大系数：

$$\alpha_{xy}=\ln(1+\Gamma_i(\mathbf{x},\mathbf{y})) \tag{10}$$

综上所述,可以得到最终的图像评价函数 **F**(I):

$$\mathbf{F}(I)=\sum_{y=1}^{n}\sum_{x=1}^{m}(\alpha_{xy}+\nabla_{xy}+\delta_{xy}) \tag{11}$$

3 仿真实验与数据分析

通过多组对比实验, 笔者将现有的 EAV、GEF、BBE 与文中所提出的算法进行对比分析, 评判各种算法的评价效果。

对于普通自然图像评价效果,以测试图 Lena(如图 1 所示)图像为实验参照,依次输入 8 幅清晰度不同的图像, 然后用 EAV、GEF、BEF 以及文中提出的算法对每一幅图像进行清晰度评价,仿真结果如图 4 所示。四种算法虽都能将图像的清晰度分辨出来,但每种算法的清晰度灵敏性不同。从图中可以发现,文中提出算法的评价值在清晰图像的临界处有着较大的差异。因此,此算法对普通自然图像有着较强的灵敏度。

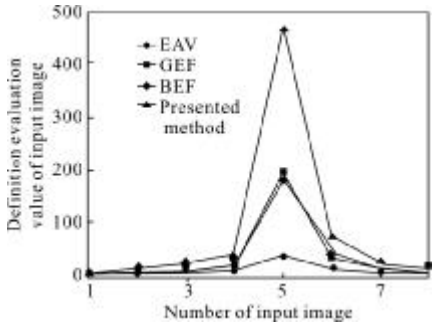

图 4 Lena(图 1)图像不同清晰度评价函数对比

Fig.4 Contrast results of different evaluation functions of Lena image in Fig.1

对于一些特殊场合所拍摄的图像, 如图 5 所示,(a1) 表示了在低照度下引入高斯噪声的小目标物图像。图中 1~4 是不同清晰度输入图像序列中的一部分图像。从仿真实验结果图(b1)中可以看出,由于噪声的干扰,EAV 算法评判失效, 几乎无法分辨图像的清晰程度;而本文提出的算法能够在很大程度上抑制噪声所带来的干扰,并能够准确的判定出图像中小目标的清晰度。对于(a2)这种高亮背景下目标物清晰度的判定,如图(b2)所示,EAV 算法几乎失效,并且对于后期清晰图像的搜索算法提出了更高的要求;GEF 与 BEF 算法虽然比 EAV 算法的评价效果好,但他们的评价值在清晰图像临界处

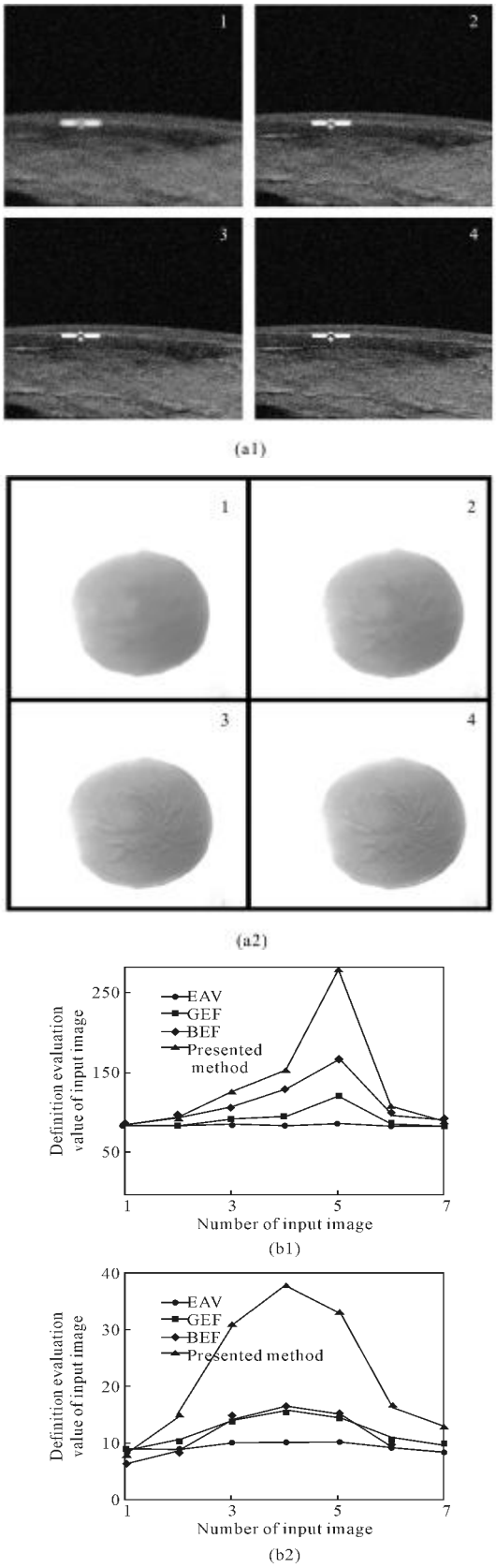

图 5 特殊场景实验对比

Fig.5 Contrast results of special scenes

变化缓和,因此灵敏度也较低。由于提出的算法在边缘亮度梯度分量前加入了非线性系数，这就使得图像的暗部细节的变化得到了扩展，提高了边缘细节的权重,从而使得评价值变化加剧,算法灵敏度提高。

为了进一步说明文中提出算法的鲁棒性，将上述图 3 进行清晰度评价对比,实验对比结果见表 2。由此可以看出，文中出的算法由于考虑到图像边缘细节的色彩相关性，在判定边缘梯度函数的同时，将边缘像素三刺激值的方差函数作为色差因子加入到评价函数中，使得算法对色彩细节更加敏感，进而对特殊色彩分布图像的清晰度有着较好的评价效果。

表 2 不同评价算法对图 3 图像的清晰度评价值

Tab.2 Definition evaluation values of different algorithms of two images in Fig.3

	Image	EAV	GEF	BEF	Presented method
HSI	(a)	0	0	0	37.815
YCbCr	(b)	0.011	0.001	0.003	42.025

4 结 论

图像清晰度评价函数的建立是相机自动对焦系统的重要环节。文中针对现有的空域评价算法的不足之处，提出了一种基于色彩相关性的图像清晰度评价算法。该算法通过对相邻像素梯度值的计算,分析出图像中的边缘细节;通过非线性系数,对不同灰度级的边缘梯度进行了扩展，提高了算法的辨识能力以及响应灵敏度。并且,评价函数中引入了色差因子,使得对图像边缘像素的色彩信息更加敏感,在不同的色彩空间下都能够准确判别图像的清晰度,提高了评价函数的鲁棒性。

此评价算法以实际工程项目为依托,具有较好的工程实践特征,能够在不同环境下准确、快速地判定图像的清晰程度。因此,该算法具有较好的使用前景。

参考文献:

[1] Xu Guili, Liu Xiaoxia, Tian Yupeng, et al. Image clarity-evaluation -function method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 180-184. (in Chinese)
徐贵力,刘小霞，田玉鹏，等. 一种图像清晰度评价方法 [J]. 红外与激光工程, 2009, 8(1): 180-184.

[2] Wang Jianhua, Deng Huaqiu, Chen Canning. Research on search algorithm for digital auto-focus [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(5): 51-54. (in Chinese)
王剑华，邓华秋，陈参宁. 数字自动对焦中的搜索算法研究 [J]. 传感器与微系统, 2012, 31(5): 51-54.

[3] Feng Jingwu, Yu Qingcang, Lv Ning, et al. Definition evaluation function of digital image in auto-focusing system [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(3): 354-356. (in Chinese)
冯精武，喻擎苍，吕宁，等. 调焦系统中数字图像清晰度评价函数的研究 [J]. 机电工程, 2011, 28(3): 354-356.

[4] Wang Jian, Chen Hongbin, Zhou Guozhong, et al. An Advanced Brenner Definition Evaluation Function [J]. Actc Photonica Sinica, 2012, 41(7): 855-858. (in Chinese)
王健，陈洪斌，周国中，等. 改进的 Brenner 图像清晰度评价算法 [J]. 光子学报, 2012, 41(7): 855-858.

[5] Chen Liang, Li Weijun, Chen Chen, et al. Efficiency contrast of digital image definition functions for general evaluation [J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(1): 152-155..
陈亮，李卫军，谌琛，等. 数字图像清晰度评价函数的通用评价能力研究 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(1): 152-155..

[6] Wang Hongnan, Zhong Wen, Wang Jing, et al. Research of Measurement for Digital Image Definition [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(7): 828-831. (in Chinese)
王鸿男，钟文，王静，等. 图像清晰度评价方法研究 [J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(7): 828-831.

[7] Li Qi, Feng Huajun, Xu Zhihai, et al. Digital Image Sharpness Evaluation Function [J]. Actc Photonica Sinica, 2002, 31(6): 736-738. (in Chinese)
李奇，冯华君，徐之海，等. 数字图象清晰度评价函数研究 [J]. 光子学报, 2002, 31(6): 736-738.

[8] Gijsenij Arjan. Color constancy for multiple light sources [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2012, 21(2): 697-707.