

基于点锐度和平方梯度的图像清晰度评价方法

薛万勋^{1,2}, 卞春江¹, 陈红珍¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100190)

摘要: 图像清晰度是衡量图像质量优劣的重要指标, 准确、高效地进行图像清晰度评价对于图像处理系统具有重要意义。为提高图像清晰度评价方法的灵敏度和抗噪性, 提出了一种结合点锐度和平方梯度的无参考图像清晰度评价方法。该方法首先通过引入高低阈值和去伪边处理实现图像分割, 得到图像平坦区和边缘区; 其次对图像平坦区和边缘区分别应用点锐度法和归一化的平方梯度法计算清晰度; 最后将二者加权求和得到图像清晰度。仿真实验结果表明, 该方法体现了点锐度法和平方梯度法的优势, 单峰性强、无偏性好、灵敏度高、抗噪性好, 能够准确稳定地评价图像清晰度。该方法可用于模糊图像的清晰度评价、实际光学系统的自动调焦和不同尺寸图像的清晰度比较。

关键词: 图像清晰度; 评价函数; 点锐度; 平方梯度

中图分类号: TP751.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2017)08-0163-05

Image clarity evaluation based on point sharpness and square gradient

XUE Wan-xun^{1,2}, BIAN Chun-jiang¹, CHEN Hong-zhen¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: Image clarity is an important index to measure image quality. Clarity evaluation accurately has significant meanings for image processing system. In order to improve the sensitivity and noise immunity, this paper proposed a no reference image clarity evaluation method based on the point acutance method and squared gradient method. Firstly, image segmentation was fulfilled by introduced threshold and removed false edges. Then the image was divided into flat zone and edge zone. Secondly, point acutance method and square gradient method were employed on the flat and edge zone respectively. Lastly, the image clarity is obtained through the weighted sum of flat sharpness and edge sharpness. Simulation experiment's results verified that the improved method reflects the advantages of point acutance and squared gradient. It has clear single apex, good unbiased, better sensitivity and noise immunity, which is able to evaluate the clarity of image accurately and stably. The improved method is suitable for evaluating blur image clarity, auto-focusing in actual optical image systems and comparing clarity of different size images.

Key words: image clarity; evaluation function; point acutance; squared-gradient

DOI:10.14022/j.cnki.dzsjgc.2017.08.039

随着图像处理技术的不断发展, 准确、客观地评价图像质量对于成像系统的调焦、图像处理系统的构建和调整、处理算法的优化等工作具有愈加重要的现实意义。图像清晰度作为衡量图像质量的重要指标, 它能够较好地反映人的主观感受, 符合人眼视觉特性。理想的图像清晰度评价函数^[1-2]应具有单峰

性、无偏性、灵敏度高、鲁棒性好、计算量小等特点。目前国内外学者对图像清晰度评价方法^[3-5]开展了广泛的研究, 主要包括空域函数、频域函数和统计学函数 3 类。其中空域函数^[6-8]主要依据边缘检测算子, 通过图像的灰度梯度差来表征图像的清晰程度, 这类方法计算简单, 实现方便, 应用广泛, 但抗噪声性能较差, 且易受光照条件和背景干扰。频域方法主要利

收稿日期: 2016-03-21 稿件编号: 201603275

作者简介: 薛万勋(1990—), 女, 黑龙江绥化人, 硕士。研究方向: 光学图像处理。

用傅里叶变换、小波变换等变换方法提取图像不同的频率成分,并以高频成分进行图像清晰度评价,该类方法灵敏度高,但计算量大,一般较少采用。统计学方法主要利用统计学思想评价图像清晰度,该类方法具有一定的抗噪性,但准确率低,灵敏度低。上述方法中评价效果较好且被广泛应用的是空域函数中的点锐度法^[9-10]和平方梯度法^[11]。点锐度法是通过改进边缘锐度算法^[12-13]得到的,主要根据图像边缘灰度变化情况来判别图像的清晰度,该方法易于实现,适用于细节丰富、有纹理特征的图像清晰度评价。平方梯度法算法简单,其平方运算提高了评价函数的灵敏度,且对背景的亮度变化有较好的适应性。但这两种方法各有缺点,点锐度法是计算整幅图像的清晰度,这使得图像平坦区也参与梯度计算,导致评价函数灵敏度下降,计算量增大。同时,平坦区的噪声也会影响评价函数的准确性。对于平方梯度法,其平方运算不仅大大增加了计算量,而且放大了噪声对于整幅图像的干扰作用。为解决上述问题,文中提出了一种结合点锐度法和平方梯度法的改进方法,该方法具有灵敏度高、抗噪性强、场景适应力强的特点。

1 基于点锐度和平方梯度的无参考图像清晰度评价

图像的边缘和局部细节决定了图像的主要特征和信息,同时也是影响图像视觉质量的重要因素。图像的边缘过渡带越窄,图像越清晰。因此突出边缘和细节在整幅图像中的作用,可以提高图像清晰度评价函数的灵敏度。以此为依据,本文的改进算法将图像分割为由边缘像素点构成的边缘区和由非边缘点构成的图像平坦区,在此过程中,通过引入高低阈值减小图像平坦区的噪声,通过去伪边处理减小孤立噪声点的影响,进而提高评价函数的抗噪性。然后,对图像平坦区应用点锐度法计算清晰度,保证评价函数的稳定性和准确性;对边缘区应用归一化的平方梯度法计算清晰度,利用其平方运算突出边缘像素点的作用,提高评价函数的灵敏度,减小计算量,避免图像平坦区中的噪声对评价函数产生干扰。同时,归一化处理便于不同尺寸图像清晰度的横向比较。最后,将平坦区清晰度和边缘区清晰度加权求和,得到图像清晰度。该方法结合了点锐度法和平方梯度法的优势,使之具有良好的抗噪性和灵敏度。该算法的流程图如图1所示。

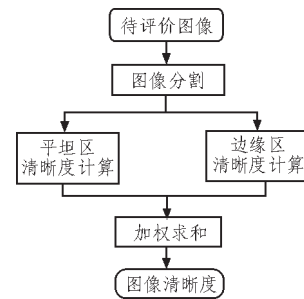


图1 图像清晰度评价流程图

1.1 图像分割

1) 梯度图像计算

考虑到像素点的八邻域具有各向异性^[14]的特点,文中对八邻域的灰度变化进行距离加权。即对像素点的 0° 和 90° 方向的相邻像素点权值取为1, 45° 和 135° 方向的相邻像素点权值取为 $1/\sqrt{2}$ 。方向模板如图2所示。将方向模板与图像进行卷积运算,得到梯度图像,其表达式为: $G=I\otimes H$ 。其中, I 表示输入图像, H 表示方向模板, G 表示梯度图像。图3(a)是引入了高斯噪声的模糊图像,对其利用图2所示方向模板进行卷积计算,得其梯度图像,如图3(b)所示。从图中可知,平坦区域存在的噪声使得平坦区也产生了较大的灰度梯度。若将其直接用于清晰度评价,将影响其评价结果的稳定性和准确性,严重时会导致评价函数不再具有无偏性和单峰性。所以本文将图像分割为边缘区和平坦区,以减少图像平坦区对评价函数的影响。

$1/\sqrt{2}$	1	$1/\sqrt{2}$
1	0	1
$1/\sqrt{2}$	1	$1/\sqrt{2}$

图2 方向模板

2) 高低阈值处理

通过分析梯度图像可知,边缘像素点具有较大的梯度,而平坦区像素点的梯度较小。依据此原理,本文对梯度图像引入高低阈值。对于所有梯度值高于高阈值的像素点,将其梯度赋值为整幅图像中最大的梯度值;对于所有梯度值小于低阈值的像素点,将其梯度赋值为整幅图像的平均梯度值;对于梯度值介于高阈值和低阈值之间的像素点,保持其梯度值不变。高低阈值的引入增强了图像边缘区和平坦区的对比度,便于后续的图像分割。该过程的表达式如式(1)所示:

$$G' = \begin{cases} GH & G \geq Th \\ G & Tl < G < Th \\ GL & G < Tl \end{cases} \quad (1)$$

其中, GH 为整幅图像的最大梯度值, GL 为整幅图像的平均值。 Th 为梯度高阈值, Tl 为梯度低阈值,

高低阈值的设置是由实验分析得到。通过对图 3(b) 进行高低阈值处理, 得到图 3(c)。

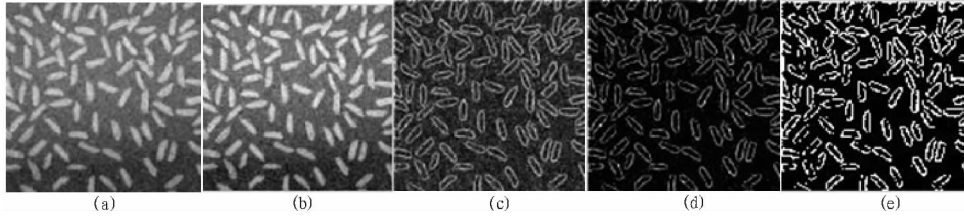


图 3 图像分割各阶段图像

3) Otsu 分割

传统的图像分割方法以最大类间方差法 (Otsu)^[15] 为代表。Otsu 的原理是利用阈值将原图像分为前景和背景两幅图像。当取最佳阈值时, 背景应与前景区别最大, 并用最大类间方差定量表示这种区别。将该方法应用于本文中, 即是把边缘作为前景, 将平坦区作为背景, 利用 Otsu 对经过高低阈值处理的梯度图像计算后得到最佳阈值 $Threshold$, 当像素点的梯度值大于 $Threshold$ 时, 将该像素点划分为边缘区像素点; 否则, 将其划分到平坦区像素点, 进而实现边缘和平坦区的分割。该过程表达式如式 (2) 所示:

$$BI = \begin{cases} E & G' \geq Threshold \\ NE & G < Threshold \end{cases} \quad (2)$$

其中, $Threshold$ 是由 Otsu 法计算得到的最佳阈值。上述过程虽然实现了边缘区与平坦区的分割, 在后续处理中可减小平坦区对于图像清晰度评价函数的影响, 但该过程并不能去除由孤立噪声点产生的伪边缘。如图 3(d) 所示。

4) 伪边缘去除

为去除孤立噪声点产生的伪边缘, 文中利用边缘具有连续性^[16]的特点, 对于 E 集合中的每个像素点计算其八邻域, 若其八邻域中至少有两个像素点被判断为边缘点, 则认为该点为真正的边缘点, 反之, 认为该点形成伪边缘, 应去除。剔除伪边缘后的梯度图像记作 $Edge$ 。该过程表达式如式 (3) 所示:

$$Edge = \begin{cases} BI & \text{sum}(x, y) \geq 2 \\ 0 & \text{sum}(x, y) < 2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\text{sum}(x, y)$ 表示像素点 (x, y) 的八邻域中被判断为边缘点的个数。该处理过程结果如图 3(e) 所示, 至此完成图像分割过程, 得到最终的平坦区 NE 和边缘区 $Edge$ 。

1.2 平坦区清晰度计算

利用点锐度算法对图像平坦区 NE 计算清晰度。具体过程是对平坦区中每个像素点计算其八邻

域像素与该像素点的灰度值之差的绝对值, 并根据距离进行加权, 即将水平和垂直方向的权重取为 1, 而将 45° 和 135° 方向上的权重取为 $1/\sqrt{2}$ 。基于点锐度函数的图像清晰度的定义如下:

$$PAV = \frac{\sum_{i=1}^{M \times N} \sum_{a=1}^8 \left| \frac{df}{dx} \right|}{M \times N} \quad (4)$$

其中, df 为灰度变化幅值, dx 是像素间的距离增量, $M \times N$ 为图像大小。

1.3 边缘区清晰度计算

利用归一化的平方梯度算法对图像平坦区计算清晰度。平方梯度函数定义式如下:

$$PSG = \sum_M \sum_N |I(i, j+1) - I(i, j)|^2 \quad (5)$$

由于 (5) 式不能实现不同尺寸图像清晰度的横向对比, 所以将该式归一化, 如式 (6) 所示。

$$SG = \frac{1}{M \times N} \sum_M \sum_N |I(i, j+1) - I(i, j)|^2 \quad (6)$$

其中, 图像大小 $M \times N$, $I(x, y)$ 表示图像像素 (x, y) 处的像素灰度值。

1.4 图像清晰度计算

对平坦区清晰度和边缘区清晰度加权求和得到整幅图像的清晰度, 其计算公式如式 (7) 如下:

$$Sharpness = \omega_1 * PAV + \omega_2 * SG \quad (7)$$

其中, ω_1 和 ω_2 分别对应平坦区清晰度和边缘区清晰度的权重, 该权重值由实验法得出。

经过上述过程, 完成图像清晰度评价。该图像清晰度评价方法在不增加计算量的前提下, 既保证了评价结果具有一定的准确性和稳定性, 又具有很高的灵敏度和抗噪性, 且受场景光照条件影响小。

2 仿真实验与结果分析

2.1 有效性验证实验

为验证改进算法的有效性, 文中采用不同模糊程

度的 13 幅高斯图像作为实验对象,模拟从离焦到准焦,再到离焦的过程(模糊半径 R 分别取为 7,6,...,2,0,2,...,7)。如图 4 所示,这 4 幅图像分别为清晰图像和模糊半径为 $R=3$ 、 $R=5$ 、 $R=7$ 的模糊图像,对应第

7 幅、第 9 幅、第 11 幅、第 13 幅图像。其中,第 7 幅图像是正焦图像。每幅图像的分辨率均为 256×256 。分别利用本文算法、点锐度算法和平方梯度算法进行图像清晰度计算。归一化的实验结果如图 5 所示。

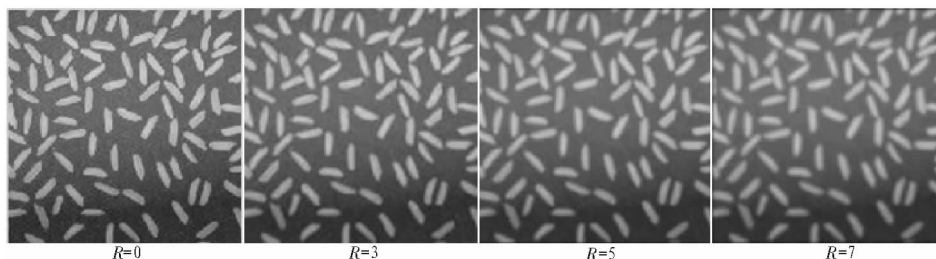


图 4 不同模糊程度的图像

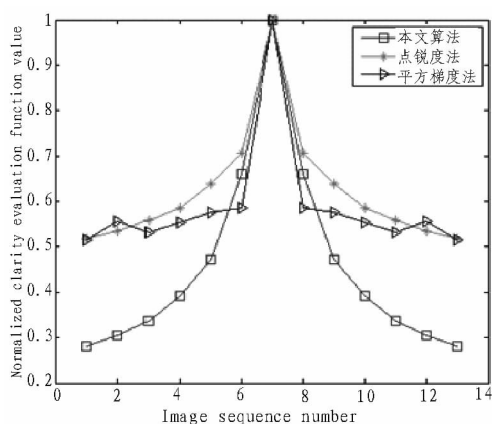


图 5 不同模糊程度图像序列的清晰度评价曲线

从图 5 中可以看出,本文提出的清晰度改进算法、点锐度算法和平方梯度算法都具有无偏性,点锐度算法具有单峰性,但其灵敏度相对较低。平方梯度算法在评价模糊程度较重的时稳定性较差,出现波动,但其灵敏度较高。而本文算法同时具有单峰性、无偏性和较高的灵敏度,稳定性较好。

2.2 抗噪性验证实验

为验证改进算法的抗噪性能,对有效性验证实验中的图像序列加入高斯噪声(均值为 0,方差为 0.002),对其分别使用本文的改进算法、点锐度算法和平方梯度算法进行图像清晰度计算。实验结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,对于含有噪声的图像,所有算

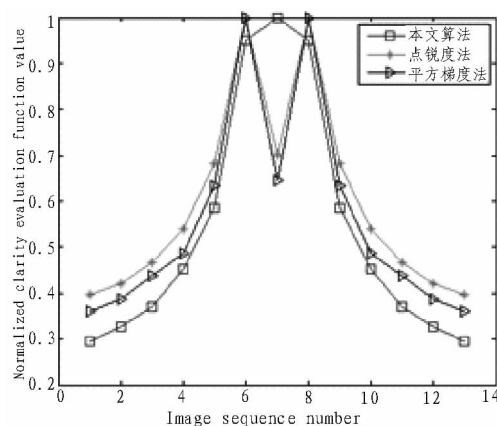


图 6 噪声图像序列的清晰度评价曲线

法都具有无偏性,但只有本文算法具有单峰性,其他两种算法都不具有单峰性,所以这两种算法对于该噪声序列图像的评价已经失效。综上所述,本文算法具有很好地抗噪性能。

2.3 局部高亮场景适应性验证实验

为验证本文算法对于局部高亮的图像具有一定的适用性,文中采用离焦模型对实际采集的局部高亮图像进行处理,共得到 13 幅图像,其中第七幅是清晰图像。如图 7 所示,图 7 中的四幅图像分别对应第 7 幅、第 9 幅、第 11 幅、第 13 幅图像。本文对上述图像序列进行实验,分别采用本文方法、点锐度方法和平方梯度方法计算图像清晰度评价,并绘制清晰度评价曲线,归一化结果如图 8 所示。

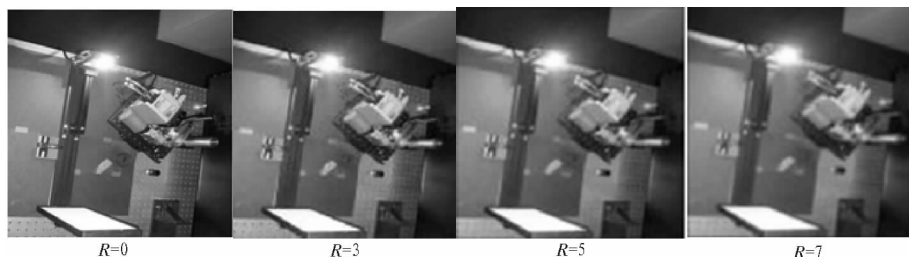


图 7 局部高亮图像

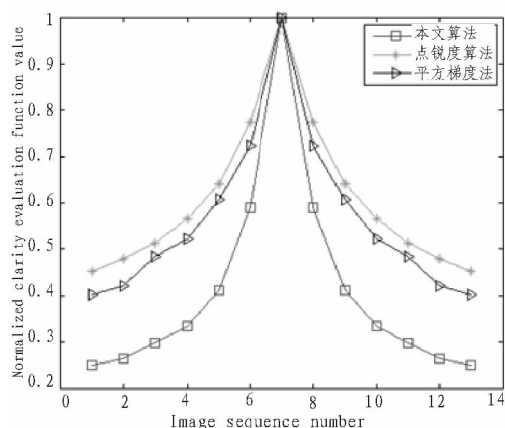


图8 局部高亮图像序列清晰度评价曲线

从图8可以看出,点锐度算法和平方梯度算法的清晰度评价曲线均具有单峰性和无偏性,但其灵敏度不高,而本文算法同时具有单峰性、无偏性、高灵敏度。该实验说明本文算法对局部高亮的场景具有很好的适用性。

3 结论

文中针对常用清晰度评价函数存在的抗噪性差、灵敏度低等问题,提出了一种改进的图像清晰度评价方法。该方法通过引入高低阈值和去伪边处理实现图像分割,将图像分割为平坦区和边缘区,减小平坦区噪声对图像清晰度评价函数准确性的影响。利用点锐度法对图像平坦区计算其清晰度,保证评价函数的稳定性和准确性。利用归一化平方梯度法对边缘区计算其清晰度,突出边缘像素的作用,提高评价函数灵敏度,且可实现不同尺寸图像清晰度的横向比较。最后将平坦区清晰度和边缘区清晰度加权求和,得到整幅图像的清晰度。通过有效性验证实验、抗噪性验证实验和局部高亮场景适应性验证实验证明了本文算法具有更好的灵敏度和抗噪性,可以准确稳定地评价离焦模糊图像的清晰度,且对局部高亮的图像具有较好的适应性,可用于模糊图像的清晰度评价、实际光学系统的自动调焦和不同尺寸图像的清晰度比较。

参考文献:

[1] 刘雪超. 基于数字图像处理的自动调焦技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究

所,2014.

- [2] 徐贵力,刘小霞,田裕鹏,等. 一种图像清晰度评价方法[J]. 红外与激光工程,2009,38(1):180-184.
- [3] 李祚林,李晓辉,马灵玲,等. 面向无参考图像的清晰度评价方法研究[J]. 遥感技术与应用,2011,26(2):239-246.
- [4] 张宏飞,张亚涛,刘志广. 基于梯度阈值计数的清晰度评价算法[J]. 科学技术与工程,2013,13(34):10364-10368.
- [5] Jorge C, Sabri G. No-reference sharpness metric based on local edge kurtosis[J]. IEEE ICIP, 2002: 53-56.
- [6] 张亚涛,吉书鹏,王强锋,等. 基于区域对比度的图像清晰度评价算法[J]. 应用光学,2012,33(2): 293-299.
- [7] 孙越,栾晓明,赵芳. 一种改进的图像清晰度评价函数[J].应用科技,2009,36(9):52-55.
- [8] 朱孔凤. 一种新的图像清晰度评价函数 [J]. 红外与激光工程,2005,34(4):446-468.
- [9] 王鸿楠,钟文,汪静,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.
- [10]王鸿楠. 卫星在轨MTF测评研究与应用[D]. 南京:南京理工大学,2014.
- [11]余军,王沛. 一种新的清晰度评价方法[J]. 电视技术,2013,13(11):75-78.
- [12]倪军,袁家虎,吴钦章. 基于边缘特征的光学图像清晰度判定[J]. 中国激光,2009,36(1):172-176.
- [13]杨斯涵. 基于边缘特征的单帧图像清晰度判定[J]. 计算机工程与应用,2009,45(30):198-203.
- [14]洪裕珍,任国强,孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. 光学精密工程,2014,22(12): 3401-3408.
- [15]OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. Automatica,1975,11 (285): 23-27.
- [16]张来线,孙华燕,郭慧超,等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法[J]. 光子学报,2013,42(5):605-610.