

基于边界梯度的自动调焦评价函数^①

吴小翠 郭斯羽 易 国 (湖南大学 电气与信息工程学院 湖南 长沙 410082)

摘要: 介绍了若干常用的评价函数, 针对基于全图像数据的评价函数的不足, 提出了基于边界梯度的评价函数, 经过二值边界提取后, 利用边界处的边缘强度来计算评价值。为克服该函数计算费时较多的缺点, 提出了一个粗调-细调结合的自动调焦方法。在实际图像上的实验结果表明, 提出的方法有效, 相比已有评价函数准确性更高, 计算速度也可接受。

关键词: 自动调焦; 边缘检测; 评价函数

Evaluation Function for Automatic Focusing Based on Boundary Gradients

WU Xiao-Cui, GUO Si-Yu, YI Guo

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Commonly used evaluation functions are introduced, and an evaluation function based on boundary gradients is proposed to overcome the shortcomings of the existing evaluation functions. The evaluation value is computed by using the edge strengths of boundary pixels after the binary boundary is obtained by edge detection procedures. Since the computation of the new function takes more time, a coarse-to-fine focusing procedure is proposed to improve the overall running speed performance. Experimental results on real images show the effectiveness of the novel method. Compared with the existing evaluation functions, the new function can achieve higher accuracy with an acceptable execution speed.

Keywords: auto-focusing; edge detection; evaluation function

光学系统中, 镜头对物体成像有一个最佳像面位置, 偏离这个位置将导致图像模糊, 成像质量下降, 因此能否精确对焦对一个成像系统是十分重要的。基于此种需要, 自动对焦成像系统应运而生。从基本原理来说, 自动调焦的方法可以分成两大类: 一类是基于镜头与被摄目标之间距离测量的测距方法, 另一类是基于数字图像处理的聚焦检测方法。前者需要额外的对焦硬件系统, 且操作比较麻烦, 而后者成像技术先进, 无需额外的对焦硬件系统, 发展较快。本文所研究的方法属于后者一类。

基于图像处理的自动对焦的核心是评价方法的选择。图像清晰度评价方法大致可以分为两类: 一类是空域的评价方法, 主要是采用不同的锐化算子对图像进行处理, 然后取处理后的数据和作为判决依据。这

类算法常见的有梯度算子评价方法、Laplacian 算子评价方法、Sobel 算子评价方法。另一类是频域的评价方法, 它是采用不同的频域变换方式, 然后根据某一范围内频率的值来判断对焦的准确性。这类方法主要有 Fourier 变化、DCT 变换法、小波变换法^[1]。目前常用的评价函数有如下几种: 频谱函数, 熵函数, 梯度函数以及平面微分平方和(SPSMD)又名能量梯度函数。

已有的方法大多利用图像的全局性数据来进行评价, 如梯度函数和平面微分平方方法等, 都是利用全图像的梯度和来计算评价函数。这种方法对于比较清晰的图像而言, 能给出较大的评价函数值, 但不能保证最大的评价函数值能对应边缘最为清晰的图像, 因为清晰的图像虽然在对象边界上能取到很大的梯度值, 但在其

^① 收稿时间:2009-05-27

他区域的梯度值很小,因此整体的梯度和不一定最大;另一方面,一些图像虽然并不是很清晰,但在对象边界附近存在一个比较大范围的较模糊的边缘区域,在这个区域内,图像的梯度值虽然没有清晰边缘那么大,但仍然相对较大,从而由于这样的象素点的数量优势,造成整体的梯度和更大,从而给出更高的评价函数值。因此,为了能准确定位清晰的图像,应该结合图像的梯度信息与图像对象的边界信息来共同给出清晰度的评价。本文提出的方法就是基于这一思路进行的。

1 常用评价函数

下面简单介绍若干常用的评价函数。

1.1 频谱函数^[2,3]

使用频谱函数的评价函数,其理论依据是:图像傅立叶变换中的高频分量对应着图像的边缘等细节信息,高频分量越多,表示细节越丰富,边缘越清晰。因而,可先对图像进行傅立叶变换,然后将高频部分求和作为评价函数值。这种方法计算量较大,难以满足实时性要求。

1.2 熵函数

熵函数作为评价图像清晰度的理论依据是:清晰的图像的熵大于模糊图像的熵^[3],即清晰的图像比模糊的图像包含更多的信息量。图像的信息熵可定义为^[4,5]:

$$H = -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log(x_i) \quad (1)$$

其中 x_i 代表灰度级,而 $P(x_i)$ 代表该灰度级在所考虑图像中出现的概率。

1.3 梯度函数

图像中的边缘信息实质上可以通过图像函数的梯度加以表示。直观来说,图像越清晰,则在图像中对象边界处的灰度变化越剧烈,即该处的梯度越大。因此,通过近似求取图像梯度,可得到图像边缘信息,并进而根据图像整体的边缘强度来作为评价函数值。其计算公式为^[2]:

$$\Phi = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |\nabla G(x,y)|^2 = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} [G_x(x,y)^2 + G_y(x,y)^2] \quad (2)$$

其中 $G(x,y)$ 代表图像函数, G_x 与 G_y 分别表示图像函数在 x 与 y 方向上的方向导数值, M 与 N 分别为图像的行

数和列数,即上公式所针对的图像大小为 $M \times N$ 。

图像函数梯度可通过梯度算子计算得到,常用的梯度算子有 Sobel 算子, Roberts 算子, Prewitt 算子及 Laplacian 算子等。平面微分平方和法 (SPSMD)^[6,7] 也可看作这类方法的一个特例,其梯度的计算公式为:

$$\begin{aligned} G_x(x,y) &= G(x+1,y) - G(x,y) \\ G_y(x,y) &= G(x,y+1) - G(x,y) \end{aligned} \quad (3)$$

该方法最大优点在于计算简单快捷,且性能也可接受。

2 基于边界梯度的调焦评价函数

上述评价函数一般都能比较清晰的图像上取得较大的评价价值,但如在引言中所指出的,这些评价函数值大多是对整幅图像中所有像素点上的信息无区别的求和得到。而实际上,对于图像清晰度的判断而言,关键在于图像中对象边界处的灰度对比足够强烈,而并非在图像的所有或大多像素点上都具有大的评价价值。另一方面,对清晰图像而言,其对象边界处的图像梯度很大,但具有较大梯度的像素点往往集中分布于边界附近一个较小的邻域内;而对于模糊图像,虽然边界处的图像梯度比前者要小,但在边界附近一个较大范围内的像素点上都能具有较大的梯度值。对全图像不加区分进行求和的结果,有可能造成后者的总评价价值大于前者,从而使调焦算法不能发现最为清晰的图像。基于这一想法,本文提出了一种基于对象边界处梯度的评价函数。第一步采用速度快但不够精确的对角灰度差分调焦函数做粗调,第二步采用速度稍逊但能准确聚焦的精确调焦函数来细调。

2.1 对角灰度差分法粗调

粗调采用 Roberts 算子计算图像梯度近似值,并根据得到的图像梯度来计算评价函数。Roberts 算子计算公式如下:

$$\begin{aligned} G_1(x,y) &= G(x,y) - G(x+1,y+1) \\ G_2(x,y) &= G(x,y+1) - G(x+1,y) \end{aligned} \quad (4)$$

评价函数如下:

$$EV_c = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} (|G_1(x,y)| + |G_2(x,y)|) \quad (5)$$

其中 EV_C 为粗对焦的评价值, A 为灰度图像。相比其他图像梯度近似算子导出的评价函数, 该方法主要优势在于计算速度快, 因为它使用 2×2 邻域, 参与计算的像素数目少, 且计算过程仅使用了加减法, 而没有较慢的乘、除、开方等运算。

2.2 细调

根据前述的思路, 在细调中, 我们引入图像中对象边界的检测, 并根据边界上的图像梯度来得到评价函数值。

2.2.1 提取图像边界

利用边缘提取算子进行边缘强度计算、阈值化与细化, 以得到二值单像素宽度的对象边界。一般而言, 现有的常用边缘检测方法如 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、LoG 算子等都可使用。出于速度方面的考虑, 我们仍使用 Roberts 算子进行边界提取。边界提取可直接通过 MATLAB 图像处理工具箱中提供的 edge 函数来完成, 调用时使用默认参数来自动得到边缘图像的二值化阈值。我们对该函数进行了修改以便获得在边界提取过程中得到的边缘强度图像。

2.2.2 计算边缘强度矩阵

边缘强度矩阵 M 就是整个图像各个点的梯度强度值。它是利用前述公式(2)修改而计算得到的。用 Sobel 算子计算灰度图像中各点处 x 、 y 方向上的梯度值, 取方向梯度平方和为该点的梯度强度值, 图像中所有点处的梯度强度值即构成边缘强度矩阵 M 。具体计算公式如下:

$$M = G_x^2 + G_y^2 \quad (6)$$

其中, Sobel 算子计算 G_x 、 G_y 公式如下:

$$G_x = G(x+1, y-1) + 2G(x+1, y) + G(x+1, y+1) - G(x-1, y-1) - 2G(x-1, y) - G(x-1, y+1) \quad (7)$$

$$G_y = G(x-1, y+1) + 2G(x, y+1) + G(x+1, y+1) - G(x-1, y-1) - 2G(x, y-1) - G(x+1, y-1) \quad (8)$$

2.2.3 计算评价函数值

设经第 2.2.1 节得到的二值边界图像为 E , 由第 2.2.2 节计算得到的边缘强度矩阵为 M 。细调的评价函数值由下式给出:

$$EV_F = \sum_{(i,j), E(i,j)=1} M(i,j) \quad (9)$$

2.3 总调焦过程

首先, 利用粗调评价函数在整个可能的调焦距离范围内计算评价值, 根据一个给定的粗调评价值阈值 TC , 找出评价值大于该阈值的那些峰。这些峰就对应了比较清晰的调焦结果。然后按一个事先通过试验获取的、具有普遍适用性的距离阈值 W , 控制电机在该距离阈值所确定峰附近的一个细调范围内运行, 在这个较小的范围内利用较精确但也较费时的细调函数获得评价值, 并最终获取最清晰的图像。

3 实验结果

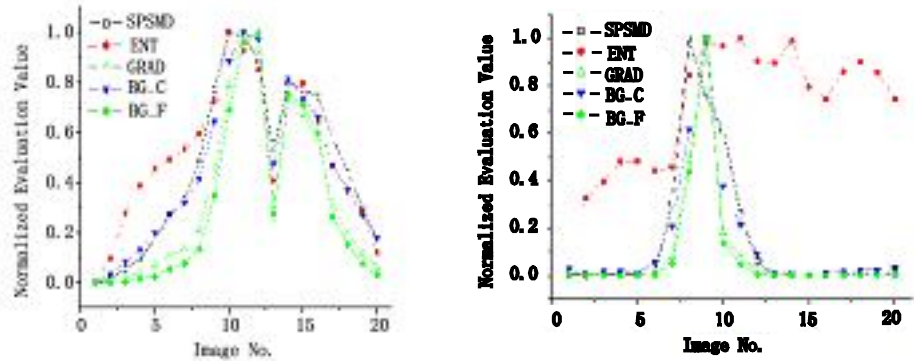
对提出的方法进行了实现, 并在实际采集的尿沉渣显微图像上进行了实验。由于篇幅有限, 这里选取了其中两组图像的结果做代表。每组图像都是 20 张, 其中 A 组图像分辨率为 320×240 像素; B 组图像分辨率为 492×335 像素。对比实验中, 我们选取了 SPSMD、熵函数(ENT)以及使用 Sobel 算子的梯度评价函数(GRAD)等三个已有评价函数, 来与我们的粗调函数(BG_C)与细调函数(BG_F)进行比较。

图 1 中给出了两组图像上不同评价函数所给出的评价值曲线。为使不同评价函数给出的评价值有可比性, 这些曲线都经过了归一化处理。

由图 1 可见, 除 ENT 方法外, 其余四种评价函数均表现出了较好的单峰性。A 组图像中出现的两个较明显的峰值是由于被检样本中被测对象分布在两个比较接近的成像层中所造成的, 在这两个峰附近, 它们各自仍表现出了较好的单峰性。从灵敏度的角度来看, BG_F 与 GRAD 均表现出峰值附近更陡峭的评价值变化, 也即它们具有更好的灵敏度; BG_C 与 SPSMD 性能较接近, 而 ENT 的表现难如人意。

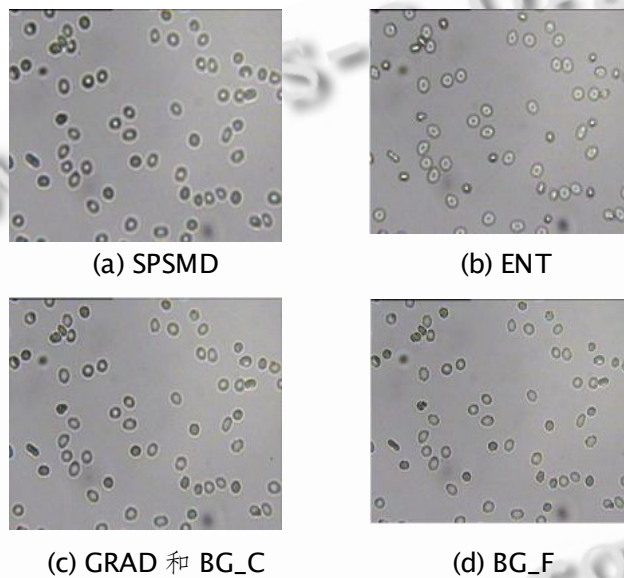
为了考察各评价函数的准确性, 在图 2 和图 3 中给出了不同评价函数所确定的最清晰图像。可见, GRAD、BG_C 和 BG_F 均能给出较好的结果, 对 B 组图像而言, 它们给出的结果一致; 但在 A 组图像上, BG_F 确定的图像更为清晰, 边缘更尖锐, 说明我们的改进思路 and 实际实现是有效的。

为考察各评价函数的运算速度, 在一台 AMD Athlon®64 X2 Dual Core 2.2GHz、896MB 内存的 PC 机上, 利用 MATLAB®7.0 实现并测得了各方法在两组图像上的运行时间, 结果在表 1 中给出。



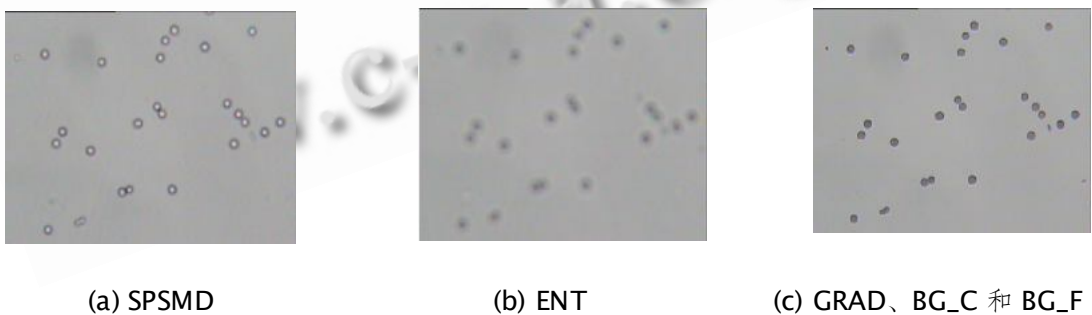
(a) A 组图像 (b) B 组图像

图 1 各评价函数给出的评价曲线



(a) SPSMD (b) ENT (c) GRAD 和 BG_C (d) BG_F

图 2 各评价函数所确定的 A 组中最清晰的图像



(a) SPSMD (b) ENT (c) GRAD、BG_C 和 BG_F

图 3 各评价函数所确定的 B 组中最清晰的图像

表 1 各评价函数的运行时间

	SPSMD	ENT	GRAD	BG_C	BG_F
A	1.4s	1.5s	0.7s	0.5s	1.4s
B	2.8s	3.1s	1.2s	0.7s	2.7s

由表可见, BG_C 具有最优速度性能, GRAD 也相差不远; SPSMD、ENT 和 BG_F 性能较接近, 相对较慢。但 BG_F 准确性较高, 时间上的代价是值得的。若采用粗调确定大致位置、小范围细调确定最终结果

(下转第 170 页)

(上接第 48 页)

的方式,可部分抵消 BG_F 速度上的不足。总体而言,本文方法具有最好的综合性能。

4 结论

自动调焦是机器视觉领域的一个重要问题,具有广泛应用价值。已有调焦评价函数多基于全图像综合计算结果来给出评价价值。本文则提出新的评价函数,注重考虑真正体现图像清晰程度的对象边界附近的边缘强度,根据这些局部信息来确定评价价值。因边界提取较费时,故提出了一个粗调-细调结合的调焦方法,以优化整体调焦速度。在实际图像上的实验表明,本文方法有效,能给出比已有方法更准确的调焦结果,具有良好的应用前景。

参考文献

1 姚松,曹丹华,吴裕斌.图像信息量的变化对自动对焦

评价函数的影响.光电工程,2006,33(5):81-84.

2 王平江,陈德均,巫孟良,陈吉红.一种复合的自动对焦方法在影响测量仪中的应用.中国机械工程,2007,18(21):2555-2560.

3 李齐,冯华君,徐之海,等.数字图像清晰度评价函数研究.光子学报,2002,31(6):736-738.

4 朱铮涛,黎绍发,陈华平.基于图像熵的自动聚焦函数研究.光学精密工程,2004,12(5):537-542.

5 孙杰,袁耀辉,王传永.数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较.光学学报,2007,27(1):36-40.

6 郑玉珍,吴勇,倪旭翔.实时自动对焦的研究.光电工程,2004,31(4):65-67.

7 郑玉珍.自动对焦中的优化爬山搜索算法.浙江科技学院学报,2006,17(3):171-174.