基于饱和像素剔除的自动对焦评价函数

王烨茹 冯华君 徐之海 李 奇 陈跃庭

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室,浙江杭州 310027

摘要 对含光源等过亮区域场景的自动对焦较为常见,这些区域导致了图像像素的饱和,然而所提出的现有的评价函数适用于一般场景,无法适用于像夜景光源的场景。针对这一问题,通过分析饱和像素在离焦过程中的特性,提出了一种去除饱和像素的图像清晰度评价方法,且其可以用于评估包含光源或者过亮区域场景的图像质量。通过对大津法进行修改得到对焦窗口二值图,并利用形态学膨胀手段扩展饱和像素区域,以防止其在离焦过程中产生弥散,得到去除饱和像素区域的模板,将其作用于梯度信息矩阵,计算得到去除饱和像素影响的平均梯度值作为自动对焦评价函数。通过多组离焦序列图测试了所提出的评价函数,并与其他4种常用的评价函数进行比较,结果表明,此自动对焦评价函数适用于含有光源等过亮区域场景的拍摄,具有良好的无偏性、单峰性、稳定性且覆盖范围较广。

Autofocus Evaluation Function Based on Saturate Pixels Removing

Wang Yeru Feng Huajun Xu Zhihai Li Qi Chen Yueting

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract The autofocus of the scenes containing high bright areas such as light sources is common and the high brightness areas lead to saturation of the image pixels. However, the existing evaluation functions are put forward for normal scenario and these cannot be applied for the scenes with light sources such as the nightscop. A sharpness evaluation function is proposed to remove saturate pixels by analyzing the performance of scenes including light sources in the process of defocus and it can be used to evaluate the image quality of scenes containing light sources or high bright areas. A binary map of focusing window is acquired by modifying the Ostu algorithm, and an expansion region of high bright areas is obtained by morphological expansion method to prevent the dispersion of bright areas caused by defocus blur. The removed bright areas template is put on the gradient information matrix, and the average gradient is used as sharpness evaluation value index. The sharpness evaluation function is applicable to the scenes containing light sources or high bright areas or high bright areas compared with other four common evaluation functions. The proposed method has favorable unbiasedness, unimodality, stability and broad coverage.

Key words imaging processing; autofocus; evaluation function; gradient operator; saturate pixels; nightscop OCIS codes 100.2960; 100.2000; 110.3000

1引言

随着数字图像和多媒体技术的快速发展,基于图像处理的自动对焦方法也越来越多地受到人们的关注。 自动对焦算法包括三个方面的内容,即清晰度评价函数、对焦窗口和搜索策略,其中能否实现准确自动对焦 的关键问题则在于选取合适的对焦评价函数。由于对焦评价函数的重要性,已有很多学者专门研究了各种 不同清晰度的评价函数,并指出了各种函数的优劣^[1-3]。目前评价函数分别有基于梯度信息的函数^[4-5]、频谱

基金项目: 国家自然科学基金(61475135)

作者简介: 王烨茹(1990—),女,博士研究生,主要从事自动对焦方面的研究。E-mail: wyrlm@zju.edu.cn

导师简介:冯华君(1963—),男,硕士,教授,博士生导师,主要从事成像系统、图像处理、遥感等方面的研究。

E-mail: fenghj@zju.edu.cn(通信联系人)

收稿日期: 2016-07-22; 收到修改稿日期: 2016-08-19

函数^[6-7]以及熵函数^[8]。随着摄影技术的发展,夜景的拍摄越来越受到人们的青睐,然而,现有的评价函数均 是对于正常场景提出的,无法适用于夜景。对于夜景等含有光源场景的拍摄而言,环境光线弱,景物在灯光 下的反差大,而成像系统的成像器件(如电子感光元件 CCD)存在动态范围的限制,当探测器像素所接受的 光子数超过了最大的容纳强度范围时便会达到饱和,从而引起该像素处的光强度在最大输出值处被截断,这 种像素及过亮区域像素称为饱和像素。当饱和像素处于离焦状态时无法准确体现真实的模糊情况,因此在 这种情况下现有的自动对焦评价函数的基本性质便会被破坏,无法为自动对焦提供可靠的依据。本文采用 饱和像素模板作用于梯度值矩阵的方法,去除了饱和像素对自动对焦评价函数的影响,得到了去除饱和像素 的评价函数,可用于含有光源等过亮区域场景的拍摄。

2 传统的自动对焦评价函数

对于对焦系统而言,图像的清晰度反映了系统的离焦或准焦程度,对焦评价函数的优劣直接决定了对焦的精度和速度。Groen等^[9-10]认为,理想的自动对焦清晰度评价函数应该满足单峰性、无偏性及稳定性,即符合理想的单峰函数的要求,峰值两侧函数趋势单调并且峰值所在位置唯一固定。

2.1 频谱函数

基于频域的调焦评价函数通过对图像进行频域变换从而实现对焦图像清晰度评价,这种方法基于傅里 叶变换,从频域上分析图像清晰度特性。在频域中,高频分量对应图像的边缘细节,高频分量越多,表示细节 越丰富,边缘越清晰。常用的频域清晰度评价方法有傅里叶变换法、离散余弦法等,然而这种方法的计算量 较大,难以满足自动对焦系统中实时性的要求。

2.2 梯度函数

对于聚焦良好的清晰图像而言,其边缘处含有更多信息,图像中对象边界处的灰度变化更剧烈,即该处的梯度越大。梯度函数便是依据这一原理,利用图像上相邻像素的差分计算出局部梯度,然后在此梯度值的基础上建立图像清晰度评价函数。

能量梯度函数 f(I)定义为

$$f(I) = \sum_{i} \sum_{j} \left\{ \left[I(i+1,j) - I(i,j) \right]^{2} + \left[I(i,j+1) - I(i,j) \right]^{2} \right\},$$
(1)

式中I为当前图像,I(i,j)为图像在像素(i,j)的灰度值。

Tenengrad 函数利用 Sobel 算子来估计水平方向和垂直方向的梯度值,为使图像边缘的梯度放大,对梯度进行平方运算。评价函数 f(I)定义为梯度的平方和,表达式为

$$f(I) = \sum_{i} \sum_{j} \left[S(i,j) \right]^{2}, S(i,j) > t, \qquad (2)$$

式中S(i,j)是像素(i,j)与Sobel算子的卷积,表达式为

$$S(i,j) = \sqrt{G_i^2(i,j) + G_j^2(i,j)}, \qquad (3)$$

引入阈值 t 用以调节评价函数的灵敏度, $G_i^2(i,j)$ 、 $G_j^2(i,j)$ 分别为水平方向和垂直方向的梯度值。

Brenner 函数是最简单的与梯度有关的评价函数,又称为梯度滤波器法,它只对相差两个单元的两个像 素灰级差进行平方,表达式为

$$f(I) = \sum_{x} \sum_{y} \left[I(x+2,y) - I(x,y) \right]^{2} .$$
(4)

2.3 熵函数

熵函数作为评价图像清晰度的理论依据是对焦良好图像的熵大于模糊图像的熵,因此可以作为一种评价标准。对于一幅图像而言,能量 *E*(*I*)和熵 *H*(*I*)分别定义为^[11]

$$E(I) = \sum_{i} \sum_{j} I(i,j), \qquad (5)$$

$$H(I) = -\sum_{i} \sum_{j} I(i,j) \ln \left[I(i,j) \right] \,. \tag{6}$$

3 剔除饱和像素的自动对焦评价函数

上述评价函数中,频谱函数计算复杂、速度慢,难以满足自动对焦系统中实时性的要求。梯度函数与熵 函数应用较为广泛,然而这些评价函数均是对于正常场景提出的,针对夜景等含有光源或者过亮区域的场景 无法实现自动对焦。在自动对焦过程中,景物从准焦到离焦,饱和像素会随着离焦程度的变大而产生弥散。 以一点光源为例,当准焦时,对于理想的成像系统其像点应该为一点像,然而所成像的光强度,并非该光源的 真实光强度,而是受到成像器件动态范围限制的像素值,即饱和像素,对于离焦情况,该点光源会发生一定程 度的弥散,而此时弥散的周边像素仍为饱和像素,形成一个均由饱和像素构成的弥散圆,反映在所获得的图 像上是一个亮度相同的亮斑,无法反应场景的真实情况,仅依据现有的自动对焦评价函数无法准确地评价其 模糊程度。对于含有饱和像素的场景而言,去除饱和像素的影响是解决含光源场景自动对焦的关键问题,因 此提出了一种剔除饱和像素的自动对焦评价函数,其计算方法框图如图 1 所示。



图 1 剔除饱和像素的自动对焦评价函数计算流程图

Fig. 1 Flow chart of the autofocus evaluation function removing the saturate pixels

3.1 基于大津算法的自适应阈值选取

阈值分割作为数字图像处理中实现灰度图像二值化的重要技术,近年来,大批国内外学者对此展开了广 泛深入的研究,并提出了多种阈值选取方法^[12-14],其中最大类间方差法也称大津法由于简单、易于实现且计 算量小而被广泛使用于图像处理系统中。大津法^[15]的基本思想是根据图像灰度直方图选取合适的阈值,当 阈值最佳时,背景应该与前景差别最大,关键在于如何选择衡量差别的标准,此标准即为最大类间方差。在 含有光源的场景图 2(a)中,饱和像素的灰度值较高,而其他的纹理区域较暗,图 2(b)给出了灰度直方图分 布,直接采用大津算法得到的二值图如图 2(c)所示,此二值图将一些灯光的反射区域均作为目标区域,只留 下一些较暗的纹理区域,不便于后续利用图像的细节信息计算评价函数值,对于含饱和像素的图像多拍摄于 夜晚或者较暗的场景,除灯光等过亮区域外的其他细节偏暗,本文根据含饱和像素图像的特点在大津算法的 基础上进行了修改,由于所要选取出的饱和像素的灰度值较高,因此引入初始阈值 T₀,在纹理信息灰度值大 于 T₀ 的图像部分进行大津阈值分割从而确定去除饱和像素的阈值 T,计算公式为

 $T = \arg\max\left[\omega_{0} \left(u_{0} - u_{T}\right)^{2} + \omega_{1} \left(u_{1} - u_{T}\right)^{2}\right], u_{0}, u_{T} > T_{0}, \qquad (7)$

式中 T 为大于初始阈值 T₀的图像中前景与背景的分割阈值,ω₀为前景点像素数占图像总像素数的比例, u₀为其平均灰度值;背景点像素数占图像总像素数的比例为ω₁,其平均灰度值为u₁。利用上述修改的大津 法进行图像分割,经验性地选取初始阈值 T₀=180,经分割得到的二值图如图 2(d)所示,可见利用修改的大 津法得到的二值图,更精确地找到了过亮区域所在的位置,同时避免了过多地去除图像中的纹理信息。

在自动对焦过程中,对于获取的含有饱和像素的图像 I,在其中任意选择一个 a×b 对焦窗口 I。,通常对



图 2 (a)含光源场景图;(b)图(a)灰度的直方图;(c)大津阈值分割得到的二值图;(d)修改的大津阈值分割得到的二值图 Fig. 2 (a) Scene with light source; (b) gray scale histogram of Fig. (a); (c) binary image obtained by Ostu threshold segmentation; (d) binary image obtained by modified Ostu algorithm segmentation 焦窗口是由用户根据自己感兴趣的区域而选择的。利用 2.1 节中修改的大津法计算对焦窗口区域阈值 T_e, 并提取出饱和像素区域模板,得到对焦窗口二值图 B_e为

$$\boldsymbol{B}_{c} = (\boldsymbol{I}_{c} > \boldsymbol{T}_{c}), \qquad (8)$$

式中B。体现了饱和像素所在区域。

3.2 饱和像素扩展区域模板

为了解决饱和像素周边区域在离焦过程中发生弥散的问题,利用形态学膨胀手段对饱和像素的模板区 域进行适当的扩展,以完全包含过亮区域,计算方法为

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{B}_{c} \bigoplus \boldsymbol{R}_{d}, \qquad (9)$$

式中 R_d 是 R×R 的结构元素, ①是膨胀操作, 得到二值化的饱和像素扩展区域模板 M。

3.3 非饱和像素的梯度信息矩阵

对于对焦窗口中的每个像素 *I*_e(*i*,*j*)采用梯度绝对值算子计算该像素的梯度值,梯度绝对值算子的计 算方法为

$$G(i,j) = |I_{c}(i,j+1) - I_{c}(i,j)| + |I_{c}(i+1,j) - I_{c}(i,j)|,$$
(10)

式中 *G*(*i*,*j*)即为像素 *I*_e(*i*,*j*)处的梯度值,*i*,*j*分别为对焦窗口中像素的行和列。计算对焦窗口中每个像 素 *I*_e(*i*,*j*)的梯度绝对值,得到对焦窗口的梯度绝对值矩阵 *G*。利用 2.1 节中得到的二值化饱和像素扩展 区域模板 *M* 作用于对焦窗口的梯度值矩阵 *G*,得到非饱和像素处的梯度信息矩阵 *W* 为

$$W = GM, \qquad (11)$$

即去除了饱和像素的影响。

3.4 去除饱和像素的清晰度评价指标

得到非饱和像素处的梯度信息矩阵W后,计算矩阵W的所有梯度元素值之和 S_w ,表达式为

$$S_{w} = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} W(i,j), \qquad (12)$$

式中*i、j*分别为*M*模板中的行和列,*W*(*i*,*j*)代表非饱和像素处的梯度信息矩阵*W*第*i*行第*j*列的梯度值。 由于利用一组离焦序列图得到的二值图*B*。范围不相同,因此,计算出的饱和像素扩展区域模板*M*以及非饱 和像素处的梯度信息矩阵*W*中的元素个数也会有所差异。为保证同一组离焦序列评价值的可比性,本文引 入非饱和像素个数作为权重因子,对非饱和像素处的梯度信息矩阵*W*的所有梯度元素值之和*S*_w求取平均 值,并将其作为最终去除饱和像素的清晰度评价函数指标*M*₁,即

$$M_{t} = S_{w}/N, \qquad (13)$$

式中 N 为 S_w 中非饱和像素的个数。

4 实验结果及分析

利用多组含光源的室内及室外实拍场景图对本文方法进行了实验验证,选取了其中三组图像的结果作 为对比实验的代表。对比实验中,分别采用了上述应用较为广泛的能量梯度函数、Tenengrad 函数、Brenner 函数以及熵函数4种评价函数,与本文提出的剔除饱和像素的自动对焦评价函数进行比较,在后续的实验描 述中使用 Desaturation 函数来表述。图3为一组室内实拍场景的离焦序列示意图,图3(a)~(e)分别为离焦 序列的第2、12、22、32和42张图像,对焦窗口选择图像正中心位置处200 pixel×200 pixel的矩形框。图3



图 3 室内实拍场景的离焦序列示意图 Fig. 3 Through-focus-series diagrams of the real-shot indoor scene

中第一行为离焦序列图,红色框为对焦窗口,第二行则为相应的对焦窗口区域放大图。对于此种实拍夜景而 言,图 3(a)为准焦位置处的图片,离焦过程中,由于对焦窗口中光源的存在,使得光源的边缘产生溢出,并产 生边缘弥散的视觉效果,随着图像离焦程度变大,非光源处变模糊,而光源处却产生弥散。

图 4 给出了这组离焦序列图分别利用 Egradient 函数、Tenengrad 函数、Brenner 函数、Entropy 函数以 及本文提出的 Desaturation 函数的归一化评价函数曲线。为了使不同评价函数给出的评价函数值具有可比 性,对这些曲线进行了归一化处理。由于对焦窗口中存在饱和像素,在离焦过程中产生了弥散,Brenner 函 数与 Entropy 函数出现了不同程度的双峰现象,在对焦搜索过程中很容易产生误判,从而导致对焦失败;而 本文所提出的剔除饱和像素清晰度评价函数(红线)结合了光源在离焦过程中的成像特点,表现出了较好的 单峰性。同时,Tenengrad 函数、Egradient 函数、Brenner 函数的覆盖范围均比较窄,在图像序列为 15 以上 已趋于平坦,无法体现模糊情况,而 Desaturation 函数由于结合了梯度绝对值算子,覆盖范围较广,较好地体 现了离焦序列的模糊程度,表现出了较好的单峰性、无偏性和稳定性。





Fig. 4 Several evaluation function normalized curves for the real-shot indoor scene

为了更直观地体现几种评价函数的优劣,本文分别采用单调性、准确性以及覆盖范围三种指标对上述评价函数的参数性能进行比较。单峰性指的是在调焦范围内只有一个极值,本文用1代表单峰性良好,用0代表出现明显多峰现象;准确性指的是当系统处于最佳对焦状态时,自动对焦评价函数给出最大值,本文用1 代表准确性良好,用0代表准确性差;覆盖范围指评价函数曲线在调焦过程的所有采样位置中有区分度(非 平缓)区域的覆盖范围,本文引入参数 Coverage 来衡量评价函数的覆盖范围 C_e,即准焦位置左右两侧非平 缓区的范围 C 与采样位置总数 L 的比值,表示为

$$C_{\rm e} = C/L \,, \tag{14}$$

其比值越大,则覆盖范围越大,表1给出了上述三个参数对几种评价函数的直观比较情况,需要指出的是,由 于覆盖范围指的是准焦位置左右两侧的范围,若准焦位置不正确,则不计算其覆盖范围,在表中用"-"表示。 表1 室内实拍场景的几种评价函数曲线参数比较

Evaluation function	Tenengrad	Egradient	Brenner	Entropy	Desaturation
Unimodality	1	1	0	0	1
Accuracy	1	1	1	0	1
Coverage	0.651	0.698	0.349	-	0.953

Table 1 Parameters comparison of several evaluation function curves for real-shot indoor scene

针对含光源的室外实拍场景进行了实验,分别以其中两个场景,即室外实拍场景1和室外实拍场景2为例。图5为室外实拍场景1的实拍离焦序列图,其中图5(a)均为准焦图像,图5(b)~(e)依次为离焦量逐渐变大的离焦序列示意图。同样用上述5种评价函数对其进行评价,图6给出了其离焦序列的归一化评价函数曲线。

对图 5 所示的室外实拍场景 1 进行分析,光源所占对焦窗口的比例较小,墙面的纹理细节较为丰富,图 6 中归一化评价函数曲线在离焦量增加的情况下,由于离焦量加纹理细节被逐渐模糊,而灯光区域逐渐弥散,使 Tenengrad、Egradient 和 Brenner 这三种基于梯度的算子计算得到的梯度值逐渐增加,导致在图像序列 20 的位置出现了翘起的现象,Entropy 函数的峰值则不在准焦位置,无法准确地体现离焦情况。本文所



图 5 室外实拍场景 1 的离焦序列示意图。(a)准焦图像;(b)~(e)离焦量逐渐变大

Fig. 5 Through-focus-series diagrams of the real-shot outdoor scene 1. (a) Focal image; (b)-(e) through-focus-amount increasing



图 6 室外实拍场景 1 的几种评价函数归一化曲线

Fig. 6 Several evaluation functionnormalized curves for the real-shot outdoor scene 1

提出的 Desaturation 函数虽然由于拍摄场景的信噪比低的问题出现了一定程度的波动,但是峰值准确地对应于准焦位置,并且随着离焦量的增加,评价函数值逐渐减小,覆盖范围较广,同样地,几种评价函数的参数比较情况由表 2 给出,通过分析表格结果可以得出,Desaturation 函数各方面性能良好,可以用于此种场景的自动对焦。

表 2	室外实拍场景1的几	小评价函数曲线参数比较

Table 2 Parameters comparison of several evaluation function curves for real-shot outdoor scene 1

Evaluation function	Tenengrad	Egradient	Brenner	Entropy	Desaturation
Unimodality	0	0	0	1	1
Accuracy	1	1	1	0	1
Coverage	0.535	0.488	0.488	-	1

图 7 为室外实拍场景 2 的实拍离焦序列图,其中图 7(a)为准焦图像,图 7(b)~(e)依次为离焦量逐渐变大的离焦序列示意图。同样用上述 5 种评价函数其进行评价,图 8 给出了其离焦序列的归一化评价函数曲线。



图 7 室外实拍场景 2 的离焦序列示意图。(a)准焦图像;(b)~(e)离焦量逐渐变大

Fig. 7 Through-focus-series diagrams of the real-shot outdoor scene 2. (a) Focal image; (b)-(e) through-focus-amount increasing

对于图 7 所示的室外实拍场景 2 而言,光源所占对焦窗口的比例较大,纹理细节包含远处的楼房及近处 的道路,较为杂乱且无规则,图 8 中的归一化评价函数曲线在离焦量增加的情况下,纹理细节变模糊,而原本 在对焦窗口占有较大比例的灯光区域发生弥散,淹没掉了对焦窗口中的更多细节信息,使 Tenengrad、 Egradient 和 Brenner 这三种基于梯度的算子将灯光区域与细节区域的边界作为边缘梯度,因此计算得到的 梯度值增加,导致在图像序列 8 的位置曲线开始急剧上升,甚至出现了双峰的现象,Entropy 函数的峰值则 不在准焦位置,无法准确地体现离焦情况。同时,表 3 给出了上述三个参数对几种评价函数的直观比较情



图 8 室外实拍场景 2 的几种评价函数归一化曲线

Fig. 8 Several evaluation functionnormalized curves for the real-shot outdoor scene 2

况,通过分析表格结果可以得到,所提出的 Desaturation 函数较好地满足了对焦评价函数的单峰性、无偏性 及稳定性,可以适用于含光源夜景实拍场景的自动对焦。

表 3 室外实拍场景 2 的几种评价函数曲线参数比较

Table 3 Parameters comparison of several evaluation function curves for real-shot outdoor scene 2

Evaluation function	Tenengrad	Egradient	Brenner	Entropy	Desaturation
Unimodality	0	0	0	1	1
Accuracy	1	1	1	0	1
Coverage	0.209	0.186	0.209	-	0.977

5 结 论

通过对夜景等含光源或过亮区域的场景进行观察,分析了传统的自动对焦评价函数无法对此类图像清 晰度进行准确评价的原因,并提出了一种去除光源影响的图像清晰度评价方法,用于评价此类图像的清晰 度。采用剔除饱和像素的方法,将去除过亮区域的模板作用于梯度信息矩阵,并以平均梯度值作为最终清晰 度评价指标,得到自动对焦评价函数。通过多组实拍实验,将本文方法与传统自动对焦方法进行比较,结果 表明,传统的评价函数会出现双峰或准确性不高的现象,同时利用表格直观地给出了量化指标的比较结果, 证明了本文方法的准确性和有效性。

参考文献

1 Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocusing criterion[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 35-39.

孙 杰,袁跃辉,王传永.数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较[J].光学学报,2007,27(1):35-39.

2 Zhai Yongping, Zhou Dongxiang, Liu Yunhui, et al. Design of evaluation index for auto-focusing function and optimal function selection[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0418002.

翟永平,周东翔,刘云辉,等.聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取[J].光学学报,2011,31(4):0418002.

- 3 Subbarao M, Tyan J K. Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 864-870.
- 4 Xu Guili, Liu Xiaoxia, Tian Yupeng, et al. Image clarity-evaluation-function method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 180-184.

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.

- 5 Sun Y, Duthaler S, Nelson B J. Autofocusing algorithm selection in computer microscopy[C]. International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005: 70-76.
- 6 Zhao Hui, Bao Getang, Tao Wei. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(5): 531-536.

赵 辉, 鲍歌堂, 陶 卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究于分析[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(5): 531-536.

7 Li Qi, Feng Huajun, Xu Zhihai, et al. Digital image sharpness evaluation function[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31 (6): 736-738.

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

8 Kang Zongming, Zhang Li, Xie Pan. Implementation of an automatic focusing algorithm based on spatial high frequency energy and entropy[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(4): 552-555.

康宗明,张 利,谢 攀.一种基于能量和熵的自动聚焦算法[J].电子学报,2003,31(4):552-555.

- 9 Groen F C, Young I T, Ligthart G. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms [J]. Cytometry, 1985, 6(2): 81-91.
- 10 Firestone L, Cook K, Culp K, et al. Comparison of autofocus methods for automated microscopy[J]. Cytometry, 1991, 12(3): 195-206.
- 11 Li Qi. Studies on the theory and implementation method of digital autofocus technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 39-42.

李 奇. 数字自动对焦技术的理论及实现方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004: 39-42.

- 12 Cinque L, Levialdi S, Rosenfeild A. Fast pyramidal algorithms for image thresholding[J]. Pattern Recognition, 1995, 28 (6): 901-906.
- Ramac L C, Varshney P K. Image thresholding based on ali-silvey distance measures [J]. Pattern Recognition, 1997, 30
 (7): 1161-1174.
- 14 Hojjatoleslami S A, Kittler J. Region growing: A new approach [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7 (7): 1079-1084.
- 15 Ostu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.