

文章编号 1004-924X(2014)12-3401-08

## 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进

洪裕珍<sup>1,2\*</sup>, 任国强<sup>1</sup>, 孙健<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100149)

**摘要:**传统的基于梯度的图像清晰度评价函数(调焦函数)对噪声敏感,在实际应用中易引入过多的非边缘信息,影响系统的稳定性。本文基于光学成像系统离焦模型分析了系统离焦对图像清晰度的影响,并提出了一种改进的图像清晰度评价方法。该方法利用最大灰度差提取细节信息来评价图像清晰度;引入阈值区分边缘点和非边缘点来减小图像平坦区域对评价函数灵敏度的影响,同时有效抑制噪声的干扰。进行了仿真实验和实际测试并与传统的清晰度评价函数进行了比较。结果显示,提出的方法具有更好的灵敏度和抗噪性能,能够准确而稳定地评价离焦模糊图像的清晰度,可用于实际光学系统的自动调焦。

**关键词:**离焦模糊图像;图像清晰度;评价函数;自动调焦

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142212.3401

## Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image

HONG YU-zhen<sup>1,2\*</sup>, REN Guo-qiang<sup>1</sup>, SUN Jian<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: hongyuzhen12@163.com*

**Abstract:** Traditional gradient based image sharpness evaluation functions are sensitive to noise, which is easy to introduce more non-edge information and shows poor stability in practical applications. This paper analyzes the effect of the defocus of an optical imaging system on image sharpness based on the defocused model and proposes a improved sharpness evaluation method. The method uses the maximum gradient as the criterion of image sharpness. Then, it introduces the optimal threshold to distinguish the edge points and non-edge points to reduce the impact of the gradient of flat area and the noise in the image on evaluation results and to suppress the noise interference. The simulation experiments and actual test are performed and obtained results are compared with that of different traditional methods. It is verified that the improved method has better sensitivity and noise immunity, which is able to evaluate the sharpness of defocused image accurately and is suitable for auto-focusing in actual optical

收稿日期:2014-08-04;修订日期:2014-09-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11178004)

imaging systems.

**Key words:** defocused blurred image; image sharpness; evaluation function; auto-focusing

## 1 引言

随着图像处理技术的快速发展,获取高质量的清晰图像对于成像系统本身和后续图像处理应用都具有重要意义。在光学成像系统中,一定距离的目标成像对应于一个准焦位置,当像面偏离该位置时,成像系统会出现离焦,并导致像质下降。为了解决成像系统的离焦问题,已经发展出多种自动调焦方法<sup>[1]</sup>。其中,基于图像处理的自动调焦方法是通过对图像进行清晰度评价,获取成像系统当前的调焦状态,进而根据调焦控制策略驱动调焦机构,获得最清晰目标图像的。

一个理想的图像清晰度评价函数(或称作调焦函数<sup>[2]</sup>)应该具有单峰性、无偏性和较好的稳定性。国内外学者对调焦函数的研究很多<sup>[3-8]</sup>,提出的方法主要有空域函数、频域函数、信息学函数和统计学函数 4 大类。其中空域函数计算简单、实现方便,从而获得了较多应用<sup>[5-8,20-21]</sup>。常见的空域函数<sup>[9-10]</sup>有平方梯度函数、Roberts 梯度函数、Brenner 函数和 Laplacian 函数等。然而,这些方法易受噪声<sup>[10]</sup>、光照条件<sup>[4]</sup>和背景<sup>[9]</sup>等外界因素干扰,在实际应用中需对其稳定性做进一步改进。文献[4]中提出了一种基于区域对比度的评价算法,该算法对场景的亮度变化有较好的适应能力,但其灵敏度还有待改进。文献[10]通过分析孤立噪声点的影响,提出了最大灰度梯度累加的图像清晰度评价算法,该算法对噪声有一定抑制,但效果不够明显。

本文从光学成像系统离焦模型出发,分析了离焦对图像清晰度的影响,为调焦函数的构建提供理论依据。针对现有调焦函数抗噪性能差的缺陷,提出了一种改进方法。该方法通过计算图像相邻像素间的最大灰度差来反映图像清晰度,并通过引入最佳阈值减小图像平坦区域和噪声对评价结果的影响。最后通过实验进行了对比验证。

## 2 离焦对图像清晰度的影响

文献[11]采用近轴几何光学模型对光学系统

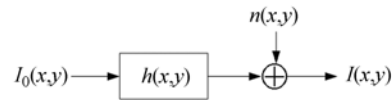


图 1 图像退化模型

Fig. 1 Image degradation model

的成像过程进行了分析,并推导出了成像系统的离焦模型。理论上,离焦图像的退化模型如图 1 所示,实际场景图像  $I_0(x, y)$  与成像系统的点扩散函数  $h(x, y)$  进行卷积后,再叠加一个加性噪声  $n(x, y)$ ,便形成了离焦模糊图像  $I(x, y)$ 。在空域其可以表示为,

$$I(x, y) = I_0(x, y) \otimes h(x, y) + n(x, y). \quad (1)$$

国内外学者对于光学成像系统的点扩散函数进行了研究,并提出了近似模型<sup>[11]</sup>,其中高斯模型在实际应用中取得了较好的效果<sup>[12]</sup>:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

其中: $\sigma$ 为扩散参数,对应于点扩散函数分布的标准差。它与模糊圆半径  $R$  成正比<sup>[11]</sup>: $\sigma = cR$ ,  $c$  为常数,实际中一般近似为  $1/\sqrt{2}$ 。

高斯模型的傅里叶变换即为成像系统的光学传递函数<sup>[11]</sup>,其表达式为:

$$H(u, v) = \exp\left(-\frac{\rho^2 \sigma^2}{2}\right), \quad (3)$$

其中: $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$ ,表示径向空间频率(radial spatial frequency)。

由上述分析可知,光学成像系统的点扩散函数等价于一个低通滤波器,且其截止频率与系统的离焦程度(像面相对于准焦位置的偏移量)相关。系统离焦量越大,则截止频率越低,频域上表现为图像的高频分量流失越严重,对应的空域图像越模糊。

分析表明,在正确对焦的情况下图像最清晰,包含的细节信息最丰富,边缘清晰可辨,边缘提取后信息量也最多。随着离焦程度的增大,图像变的模糊,细节表现的也越不明显,边缘变平滑,所提取的边缘信息量越少。据此,可通过提取图像边缘信息来反映图像的清晰度。

根据图像处理理论,图像边缘的提取一般通

过梯度算法来实现<sup>[13]</sup>。因此,可采用梯度算法提取图像边缘信息,以建立图像清晰度评价函数,并依据该评价函数调整图像对焦。

### 3 图像清晰度评价函数改进

目前,对于梯度法图像清晰度评价函数的研究较广泛,常见的有平方梯度函数、Roberts 梯度函数、Brenner 函数和 Laplacian 函数等<sup>[9-10]</sup>。然而采用这些函数对实际图像进行清晰度评价时,一方面成像过程中引入的噪声会对评价结果产生影响,使调焦稳定性下降;另一方面由于图像平坦区域参与梯度计算也会使调焦曲线灵敏度下降,影响系统调焦精度。针对图像清晰度评价函数在实际应用中存在的不足,这里对算法本身提出了改进:(1)考虑像素点不同方向的灰度差,将其中的最大值作为该像素点的梯度值;(2)通过引入阈值提取边缘信息,以减小图像平坦区域像素梯度和噪声对评价函数的影响;(3)剔除由噪声点产生的孤立伪边缘,进一步提升评价函数的抗干扰能力。

#### 3.1 最大灰度梯度图像

采用图 2(a)的模板作为水平正方向梯度算子,模板中的加权系数考虑了与当前像素的空间位置关系。将该模板逆时针旋转分别得到 45、90、135、180、225、270 和 315°方向的梯度算子,分别如图 2(b),2(c),2(d),2(e),2(f),2(g),2(h)所示。将图 2 中的方向模板分别与源图像 I 进行卷积,得到不同方向对应的梯度图像,其表达式

如下:

$$F_i = I \otimes h_i, \quad (4)$$

其中:  $i = \{0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315^\circ\}$ 。然后取不同方向梯度图像  $(x, y)$  处的最大值作为该像素点的梯度值,用  $G(x, y)$  表示,则有:

$$G(x, y) = \max\{|F_i(x, y)|\}. \quad (5)$$

由于  $|F_{0^\circ}| = |F_{180^\circ}|$ ,  $|F_{45^\circ}| = |F_{225^\circ}|$ ,  $|F_{90^\circ}| = |F_{270^\circ}|$ ,  $|F_{135^\circ}| = |F_{315^\circ}|$ , 实际只需采用图 2(a),2(b),2(c),2(d)4 个方向模板计算便可得到最大灰度梯度图像 G。

图 3(a)为源图像 I 加入了高斯白噪声的离焦模糊图像,图像大小为  $M \times N$ ,采用上述计算方法得到的最大灰度梯度图像 G 如图 3(b)所示。从图中可看出,受噪声影响图像平坦区域也产生了较大的灰度梯度。若将这些灰度梯度计入清晰度评价函数,将导致其灵敏度和稳定性下降。

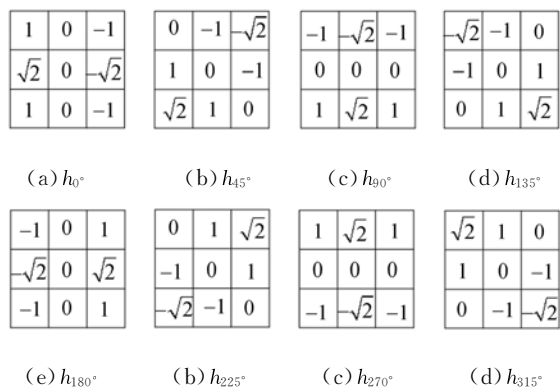


图 2 方向模板  
Fig. 2 Direction templates

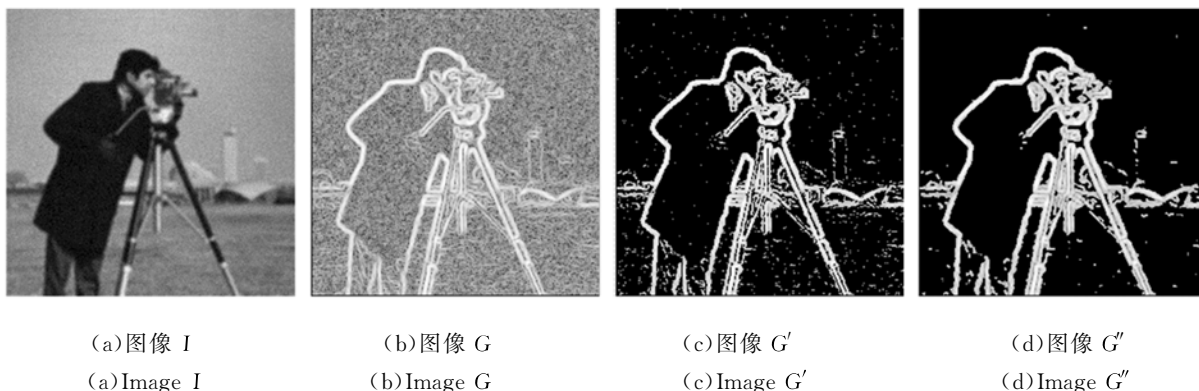


图 3 源图像和不同阶段处理的灰度梯度图像

Fig. 3 Source image and gradient images in different processing stages

### 3.2 阈值的引入

为了减小图像平坦区域像素梯度和噪声对评价函数的影响,可引入一个灰度梯度阈值,只有超过这个阈值的灰度梯度才被采用<sup>[15]</sup>。

对于阈值的选取问题,文献[14-16]中分别提出了不同的计算方法。但理论上,这些方法都不是最佳的,而是由实验分析得到的一个经验性的阈值选取方法。其实,通过上面分析,已经得到了图像  $I$  的梯度图像  $G$ ,而灰度值较大的梯度图像  $G$  对应的就是边缘。如果把边缘作为目标,非边缘作为背景,就可将阈值选取转化为对梯度图像  $G$  进行分割的问题。关于这一问题,著名的 Otsu 分割算法<sup>[17]</sup>给出了理论上最佳阈值的选取方法和详细推导过程。

传统 Otsu 方法需要利用穷举法搜索来获得最佳阈值,计算量较大,实际应用中一般采用下面的迭代算法:

(1) 为阈值  $T$  选取一个初始估计值  $T_0$  (一般采用图像的均值);

(2) 利用阈值  $T$  对梯度图像  $G$  进行分割,将梯度图像分为两类,即  $G_1 = \{G(x, y) | G(x, y) > T\}$  和  $G_2 = \{G(x, y) | G(x, y) \leq T\}$ ;

(3) 计算  $G_1$  和  $G_2$  的均值,分别用  $\mu_1$  和  $\mu_2$  表示;

(4) 计算新的阈值:  $T_{\text{new}} = \frac{1}{2}(\mu_1 + \mu_2)$ ;

(5) 如果  $T_{\text{new}} = T$  或  $T_{\text{new}} - T < \delta$  ( $\delta$  为预定义的一个较小值),则得到阈值  $T$ 。否则,用  $T_{\text{new}}$  替换  $T$ ,并重复步骤(2)~(4),直到满足条件为止。

在实验中发现,迭代一次得到的值已经较接近最佳阈值。为了简化算法,后面实验中选取阈值时,只进行了一次迭代。

### 3.3 构建清晰度评价函数

通过引入阈值,可得到新的灰度梯度图像  $G'$ ,具体表示如下,

$$G'(x, y) = \begin{cases} G(x, y) & G(x, y) > T \\ 0 & G(x, y) \leq T \end{cases} \quad (6)$$

如图 3(c) 所示,灰度梯度图像  $G'$  可以较好地提取图像的边缘信息,从而减小了图像平坦区域的影响,同时对噪声也有一定的抑制作用,但仍无法消除由于孤立噪声点产生的图像伪边缘。

由图像边缘分割理论可知,如果一个像素是图像边缘,那么它的八邻域至少还有 2 个像素是图像边缘<sup>[10]</sup>。据此,可通过对灰度梯度图像  $G'$  所在边缘的八邻域进行搜索判断,来剔除其中的伪边缘。将剔除伪边缘后的梯度图像记为  $G''$ ,则有,

$$G''(x, y) = \begin{cases} G'(x, y) & Edge(x, y) > 2 \\ 0 & Edge(x, y) \leq 2 \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $Edge(x, y)$  表示像素点  $(x, y)$  的八邻域中边缘点的个数。由图 3(c), 3(d) 对比可看出,上述剔除方法获得的梯度图像  $G''$  可以有效抑制孤立噪声点产生的图像伪边缘。

通过引入阈值判别和伪边缘抑制,减小了平坦区域像素和噪声的影响,使所获得的梯度图像  $G''$  能更好地提取图像的边缘信息。采用梯度图像  $G''$  的平方和来表征源图像  $I$  整体的边缘信息,由此评价图像清晰度,其结果也更准确而稳定。用  $V(D)$  表示归一化后的清晰度评价函数值,其表达式为:

$$V(D) = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [G''(x, y)]^2 \quad (8)$$

由于边缘像素梯度比非边缘像素梯度要大,这里对梯度进行平方运算可增强边缘像素的作用,以进一步提高评价结果的准确性。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 抗噪性能实验仿真

为了验证改进算法的有效性,文中采用高斯离焦模型对实际采集的图像进行处理,获得了 19 幅模拟从离焦到准焦,再到离焦过程的图像序列(模糊圆的半径  $R$  分别取为 9, 8, ..., 0, 1, 2, ..., 9); 然后通过分别在图像样本序列中加入了轻度高斯噪声(均值为 0, 方差为 0.01)和重度高斯噪声(均值为 0, 方差为 0.05)来模拟实际采集图像的多种噪声误差<sup>[18]</sup>。这样便获取了受不同程度噪声干扰的 3 组图像序列。图 4、图 5 和图 6 分别给出了各组图像序列中不同模糊程度的 3 幅图像。

对上面 3 组图像序列进行实验,分别采用平方梯度函数、Roberts 梯度函数、Brenner 函数、Laplacian 函数、文献[4]和文献[10]以及本文方法求得图像清晰度评价函数,并绘制清晰度评价曲



(a) R=0 (b) R=3 (c) R=8

图 4 不同模糊程度的图像(无噪声)

Fig. 4 Images in different blur levels (without noise)



(a) R=0 (b) R=3 (c) R=8

图 5 不同模糊程度的图像(轻度噪声,均值为 0,方差为 0.01)

Fig. 5 Images in different blur levels (with slight noise, mean=0 and variance=0.01)



(a) R=0 (b) R=3 (c) R=8

图 6 不同模糊程度的图像(重度噪声,均值 0,方差 0.05)

Fig. 6 Images in different blur levels (with heavy noise, mean=0 and variance=0.05)

线,结果分别如图 7、8、9 所示。

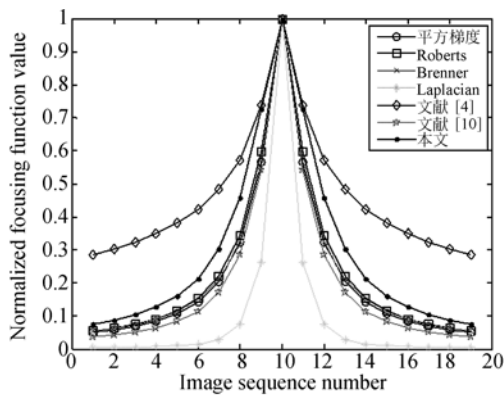


图 7 对无噪声图像序列的清晰度评价曲线

Fig. 7 Sharpness evaluation curves of image sequence without noise

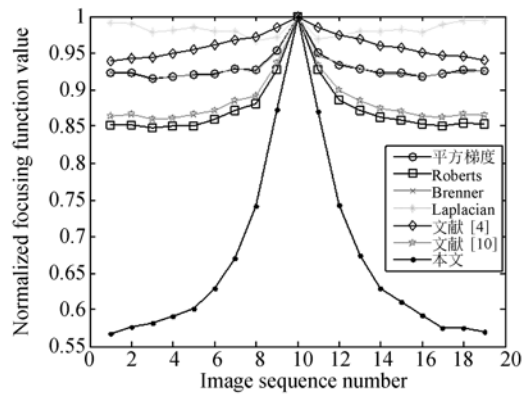


图 8 对轻度噪声图像序列的清晰度评价曲线

Fig. 8 Sharpness evaluation curves of image sequence with slight noise

从图 7~9 可以看出,在没有噪声的情况下,所有的评价函数都能正确分辨最清晰的图像,其评价函数曲线均满足单峰性和无偏性。当图像受到轻度噪声干扰时,除了本文的改进方法外,其余评价函数曲线的灵敏度均严重下降,而且随着噪声的干扰加大,有的评价函数甚至已经失效,而本文提出的方法仍然能正确分辨最清晰的图像,这表明本文方法具有较好的抗噪性能。

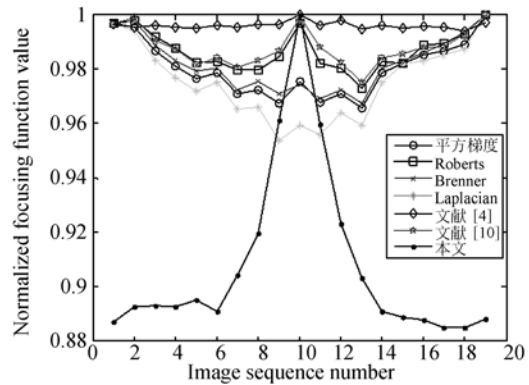


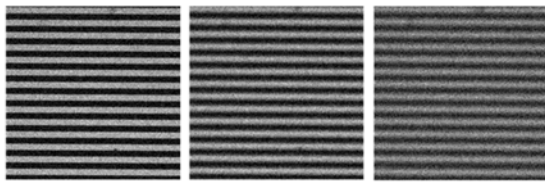
图 9 对重度噪声图像序列的清晰度评价曲线

Fig. 9 Sharpness evaluation curves of image sequence with heavy noise

### 4.2 实际测试结果评估比较

为了进一步验证调焦评价函数的性能,利用某型光学成像设备在不同调焦位置采集了 50 幅图像(图 10 为采集到的不同离焦程度的 3 幅图像),并对实际采集到的从离焦到准焦再到离焦的系列图像进行了清晰度评价,调焦函数曲线如图 11 所示。

文献[19]对调焦函数性能提出了 6 个评价指



(a)正焦 (b)轻度离焦 (c)重度离焦  
(a)Normal focus (b)Slight defocus (c)Severe defocus  
图 10 不同离焦程度的图像

Fig. 10 Different levels of defocused images

标:陡峭区宽度、清晰度比率、陡峭度、平缓区波动量、局部极值因子和灵敏度。这些指标从不同角度描述了调焦评价函数的性能。为了定量评估调焦评价函数的性能,本文分别计算了这 6 个评价指标值,结果如表 1 所示。

由图 11 可知,此时 Laplacian 函数评价方法已经失效,故表 1 中 Laplacian 一栏数据为空。从表 1 中数据可看出,本文提出的方法同时具有较

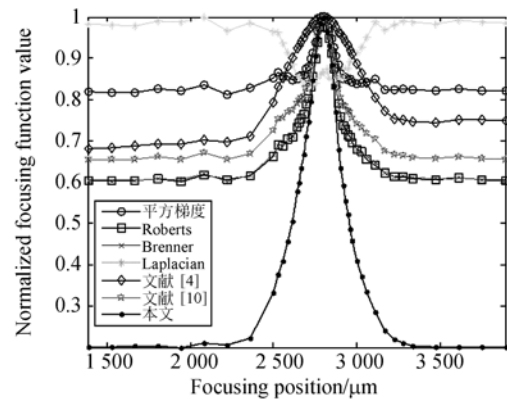


图 11 调焦函数曲线

Fig. 11 Focusing function curves

大的陡峭区宽度、较大的清晰度比率、较大的陡峭度、较小的平缓区波动量和较大的灵敏度,因此相比其他调焦评价函数有更好的灵敏度和抗噪性能。

表 1 调焦评价函数曲线的 6 个评价指标值

Tab. 1 Evaluation index values for focusing function curves

评价方法	陡峭区宽度/mm	清晰度比率	陡峭度	平缓区波动量	局部极值因子	灵敏度
平方梯度	0.263 9	1.234 9	1.123 7	0.017 9	0.067 1	0.166 0
Roberts	0.611 1	1.661 6	1.139 8	0.005 6	0.025 4	0.305 5
Brenner	0.611 1	1.660 8	1.119 7	0.006 6	0.031 2	0.307 1
Laplacian	-	-	-	-	-	-
文献[4]	0.666 7	1.468 4	0.653 1	0.006 8	0.031 2	0.052 3
文献[10]	0.611 1	1.528 4	0.933 8	0.006 7	0.026 2	0.235 3
本文	0.861 1	4.979 5	1.807 9	0.003 1	0.048 5	0.496 7

## 5 结 论

本文针对传统的清晰度评价函数会引入过多的非边缘信息,影响其灵敏度,而且容易受噪声干扰,使得稳定度下降等问题,提出了一种改进的图像清晰度评价方法。该方法利用最大灰度差提取

细节信息来评价图像清晰度,并通过引入阈值将边缘点和非边缘点区分开来减小了图像平坦区域对评价函数灵敏度的影响,同时也有效抑制了噪声的干扰。通过实验仿真和实际测试可知,改进的方法具有较好的灵敏度和抗噪声性能,能够准确而稳定地评价离焦模糊图像的清晰度,可用于实际的自动调焦系统。

## 参考文献:

- [1] 原育凯. 光学系统的自动调焦方法[J]. 红外, 2004, (6): 15-21.  
YUAN Y K. The auto-focusing technology of optical system [J]. *Infrared*, 2004, (6): 15-21. (in

Chinese)

- [2] 麻恒阔, 魏国强. 基于图像处理自动调焦方法的稳定性研究[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(2): 33-36.  
MA H K, WEI G Q. Study on stabilization of auto-focusing method based on image processing [J]. A-

- viation *Precision Manufacturing Technology*, 2007,43(2): 33-36. (in Chinese)
- [3] 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.  
ZHANG H F, ZHANG Y T, LIU ZH G. Focus-evaluation algorithm based on gradient threshold count [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013,13(34): 10364-10368. (in Chinese)
- [4] 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.  
ZHANG Y T, JI SH P, WANG Q F, *et al.*. Definition evaluation algorithm based on regional contrast [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 293-299. (in Chinese)
- [5] XU X, ZHANG X L, FU H D, *et al.*. Robust passive autofocus system for mobile phone camera applications [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2014, 40(4): 1353-1362.
- [6] 许兆林,王尚强. 图像清晰度评价函数在航空相机中的应用[J]. *电光与控制*, 2012, 19(7): 57-59.  
XU ZH L, WANG SH Q. Application of the image definition criterion function in aerial camera [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(7): 57-59. (in Chinese)
- [7] 范媛媛,沈湘衡,桑英军. 基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2485-2493.  
FAN Y Y, SHEN X H, SANG Y J. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2485-2493. (in Chinese)
- [8] RUDNAYA M E, TER MORSCH H G, MAUBACH J M L, *et al.*. A derivative-based fast autofocus method in electron microscopy [J]. *J Math Imaging Vis.*, 2012, 44(1): 38-51.
- [9] 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 imaging measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 531-536. (in Chinese)
- [10] 张来线,孙华燕,郭惠超,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.  
ZHANG L X, SUN H Y, GUO H CH, *et al.*. Auto focusing algorithm based on largest gray gradient summation [J]. *Acta Photonica Sinica.*, 2013, 42(5): 605-610. (in Chinese)
- [11] SUBBARAO M, CHOI T S, NIKZAD A. Focusing techniques [J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(11): 2824-2836.
- [12] 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, (4): 921-924.  
XIE X F, ZHOU J, WU Q ZH. No-reference quality index for blur image [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, (4): 921-924. (in Chinese)
- [13] 卢振华. 推扫式遥感相机基于图像的实时自动调焦研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.  
LU ZH H. *The automatic image-based real-time focusing research in pushbroom remote sensing camera* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [14] 高赞,姜威,朱孔凤,等. 一种自适应的自动聚焦算法[J]. *光学学报*, 2006, 26(10): 1474-1478.  
GAO Z, JIANG W, ZHU K F, *et al.*. An auto-adaptive algorithm to auto-focusing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(10): 1474-1478. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 莫春红,刘波,丁璐,等. 一种梯度阈值自动调焦算法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 323-327.  
MO CH H, LIU B, DING L, *et al.*. A gradient threshold auto-focus algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 323-327. (in Chinese)

- Chinese)
- [17] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *Automatica*, 1975, 11(285-296): 23-27.
- [18] 许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD 噪声分析及处理技术[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(4): 343-346.  
XU X ZH, Li Z T, XUE L J. Analysis and processing of CCD noise [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 343-346. (in Chinese)
- [19] 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): 234-244.  
ZHAI Y P, ZHOU D X, LIU Y H, *et al.*. Design of evaluation index for auto-focusing function and optimal function selection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 234-244. (in Chinese)
- [20] 陈芳, 张存继, 韩延祥, 等. 简单图像的快速聚焦[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 220-227.  
CHEN F, ZHANG C J, HANG Y X, *et al.*. Fast focus on simple images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 220-227. (in Chinese)
- [21] 张艳超, 赵建, 韩希珍, 等. SUSAN 清晰度评价函数在自动对焦中的应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 240-244.  
ZHANG Y C, ZHAO J, HANG X ZH, *et al.*. Application of SUSAN definition evaluation function in auto-focusing [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 240-244. (in Chinese)

#### 作者简介:



洪裕珍(1989—),男,江西上饶人,博士研究生,2012年于武汉大学获得学士学位,主要从事自动调焦和图像质量评价方面的研究。E-mail: hongyuzhen12@163.com

#### 导师简介:



任国强(1971—),男,山西忻州人,博士,研究员,1994年于武汉大学获得学士学位,2001年于中国科学院光电技术研究所获得硕士学位,2007年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位,主要从事光电记录系统和嵌入式系统方面的研究。E-mail: rencrux@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)