

doi: 10.3788/gzxb20124107.0855

改进的 Brenner 图像清晰度评价算法

王健^{1,2}, 陈洪斌¹, 周国忠¹, 安涛¹

(1 中国科学院光电技术研究所; 中国科学院光束控制重点实验室, 成都 610209)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 图像清晰度评价是基于数字图像的被动式自动调焦技术的基本问题之一. 传统 Brenner 图像清晰度评价算法具有运算速度快特点, 但是其评价准确性取决于阈值选取, 且其灵敏度较低. 针对上述问题, 本文提出了一种改进算法. 改进算法采用高通和带通两个滤波器对图像进行计算, 克服阈值对传统 Brenner 算法评价结果的影响. 为了衡量改进算法的性能, 将其与传统的 Brenner 算法比较, 并对评价算法的单峰性、无偏性、灵敏度、计算量等主要衡量标准逐一分析. 实验结果表明: 与传统的 Brenner 评价算法相比, 改进算法在满足评价算法单峰性和无偏性前提下, 提高了灵敏度, 降低了计算次数.

关键词: 图像清晰度; 评价算法; Brenner; 阈值; 灵敏度

中图分类号: TP742

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)07-0855-4

0 引言

在光学系统中, 一定距离的目标物体成像有一个最佳位置, 这个位置称为正焦位置. 当成像位置偏离这个最佳位置时, 系统发生离焦, 造成目标成像模糊. 离焦现象会影响系统的性能. 调整光学系统由离焦到正焦的过程称为调焦. 基于数字图像的被动式自动调焦技术不依赖于距离信息, 直接通过采集图像的清晰度进行调焦, 具有调焦智能化、电路和运动机构简化等优点, 广泛用于各种光学成像系统中. 近年来, 随着数字图像分析技术的飞速发展, 基于图像的被动调焦技术的应用范围也在不断扩大^[1-7].

基于图像清晰度调焦的重要问题之一是如何评价图像的清晰度^[1]. 对于光学系统, 正焦状态下图像细节丰富, 在空域表现为相邻像素的特征值(如灰度)变化较大, 在频域表现为频谱的高频分量多, 对比度也更强烈; 离焦状态下的图像像素互相重叠, 成像轮廓平滑, 细节部分丢失, 图像模糊^[4]. 利用图像的这些特性, 国内外学者构造了多种清晰度评价算法^[1-7]. 文献[2]提出 TennenGrad 改进算法用于显微镜的粗调焦; 文献[3]提出一种最大灰度梯度法实现经纬仪的自动调焦控制; 文献[4]提出用于会议电视摄像机的自动聚焦方法; 文献[5]提出基于最小各向同性小波滤波的图像清晰度评价算法; 文献[6]针对大多数调焦函数不能克服对比度变化引起的调焦

曲线的局部极值而提出一种新算法; 文献[8-10]对常用的调焦算法进行对比评价, 结果表明空域算法运算速度快, 适用于实时场合, 而频域算法具有高灵敏度, 满足准确度要求. 目前尚无既满足运算速度快, 又符合较高灵敏度的评价函数的报道. 本文在空域 Brenner 算法基础上对上述问题进行初步研究.

空域梯度评价算法是以图像像素的直接处理为基础, 计算简单直观, 其中 Brenner 算法是最简单的算法. 本文首先对传统的 Brenner 算法特性进行分析, 针对其依赖阈值的问题提出了一种改进算法, 通过实验验证了该算法在不增加复杂度的前提下可以有效地进行图像清晰度评价, 并且具有较好的灵敏度.

1 算法分析

1.1 传统 Brenner 算法

Brenner 算法以 Brenner 算子为基础, 只计算相差两个单元的两个像素的灰度级差, 具有简捷实用、计算量少等特点. 一幅大小为 $M \times N$ 的灰度图像 $f(x, y)$ 的 Brenner 清晰度评价算法的定义为^[1].

$$F_{\text{Brenner}} = \sum_M \sum_N (f(x+2, y) - f(x, y))^2 \quad (1)$$

式中 $(f(x+2, y) - f(x, y))^2 > \text{Threshold}$

根据 Brenner 清晰度评价算法的定义, 正焦位置清晰图像具有最大的评价价值, 因此在调焦中, 可以

基金项目: 中国科学院重点实验室预研基金课题(No. A09K002)资助

第一作者: 王健(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光电图像处理. Email: wangjian6895@163.com

导师: 陈洪斌(1953-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为光学和光束控制技术等. Email: chbin@ioe.ac.cn

收稿日期: 2012-03-06; **修回日期:** 2012-04-13

比较不同位置的图像评价价值来确定图像接收装置的移动方向,从而实现对焦.

在实际应用中,Brenner 算法对滤波后图像进行阈值判断,只计算大于一定阈值的能量.因此,Brenner 算法的准确性取决于阈值选取,阈值对评价函数的性能影响比较大,合适的阈值可以很好地评价图像清晰度.阈值越低,Brenner 算子能够检测出的像素越多,评价结果也就越容易受到噪音的影响.与此相反,一个高的阈值将会遗失过多的图像细节,从而降低评价准确性.

1.2 改进的 Brenner 算法

数字图像处理理论认为,图像的的低频和中频段能量占总能量的大部分比例,高频能量占较少比例,但图像轮廓的锐度和细节的丰富度则取决于图像的高频成份.也就是说,清晰图像相对于模糊图像具有更多的高频能量.因此可以通过高通滤波器或者低通滤波器滤除能量比例比较大的低频成分,对处理后的图像进行中高频信息计算,并根据计算结果衡量图像清晰度^[10-11].

Brenner 梯度算子可以看作是模板 $T = [-1 \ 0 \ 1]$ 和对应位置的图像像素 $[f(x, y) \ f(x+1, y) \ f(x+2, y)]$ 依次进行卷积,也就是在待处理的图像中逐点地移动掩模模板,在图像中的每一像素点处,其响应为掩模模板系数与掩模下方相应的像素值的乘积之和.模板 $T = [-1 \ 0 \ 1]$ 是一个带通滤波器,Brenner 梯度算子正是通过带通滤波来滤除比例较大的低频能量,保留图像中的中频部分能量.

本文改进算法采用两个模板滤波器来克服阈值对传统 Brenner 算法评价结果的影响.两个滤波器模板分别是带通滤波器 $T = [-1 \ 0 \ 1]$ 和高通滤波器 $G = [-1 \ 1]$ ^[11].用两个滤波器模板对图像分别进行滤波,通过计算低频部分能量和高频部分能量来评价图像清晰度.改进的清晰度评价算法可定义为

$$F_{\text{NewBrenner}} = \sum_M \sum_N |f(x+1, y) - f(x, y)| - \sum_M \sum_N |f(x+2, y) - f(x, y)| \quad (2)$$

改进算法在滤除比例较大的低频成分的同时,保留了图像细节丰富的中高频成分.另外,算法采用两个模板计算图像能量差,因此可以不依赖阈值,有效地解决了传统 Brenner 算法依赖阈值的问题.

2 实验分析

对于同一目标,调焦次镜位置采集正焦附近的图像,在目标窗口的中心区域截取大小为 371×401 的 25 幅图像,其中正焦清晰图像和离焦模糊图像分别如图 1 和图 2^[12].



图 1 正焦图像

Fig. 1 Focusing image of object



图 2 离焦图像

Fig. 2 Defocusing image of object

2.1 传统 Brenner 算法分析

首先分析阈值对传统 Brenner 算法的影响.针对目标图像,阈值为 0, 0.01 和 0.025 的 Brenner 算法清晰度评价结果如图 3.横坐标为图像序列的序号,纵坐标为图像清晰度评价结果的归一化值.

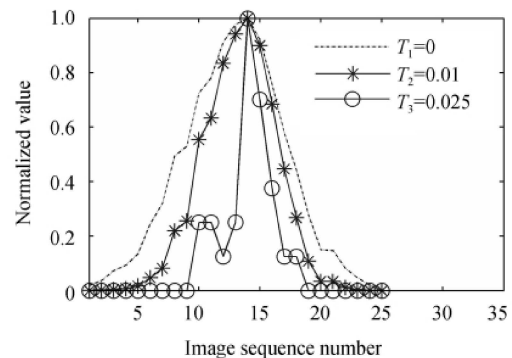


图 3 不同阈值的 Brenner 算法评价结果

Fig. 3 Evaluation results of different threshold values of Brenner algorithm

通过图 3 可以看出,传统的 Brenner 算法对图像的清晰度评价依赖于阈值的选取,不同阈值对评价结果产生不同的影响,不合适的阈值可能导致评价失败.阈值 $T_1 = 0$ 和 $T_2 = 0.01$ 可以比较准确地区分出两幅模糊程度不同的图像,因此可以认为阈值 0 和 0.01 是此场景下合适的阈值.另外,阈值为 0.01 的 Brenner 算法在一定离焦程度下出现评价值为 0,因此认为阈值为 0 是此场景下最优的阈值.

阈值 $T_3 = 0.025$ 不能完全区分模糊程度不同的图像,也就是在阈值 0.025 下, Brenner 算法给出的评价值和实际图像模糊程度不一致,也就是有可能具有较大评价值的图像看起来反而比具有较小评价值模糊. 这是因为一个大的阈值遗失了过多的细节,从而造成评价结果不准确.

2.2 改进算法分析

利用改进的算法对场景进行清晰度评价,得到的评价结果如图 4. 其中横坐标是图像序列的序号,纵坐标是图像清晰度评价结果的归一化值.

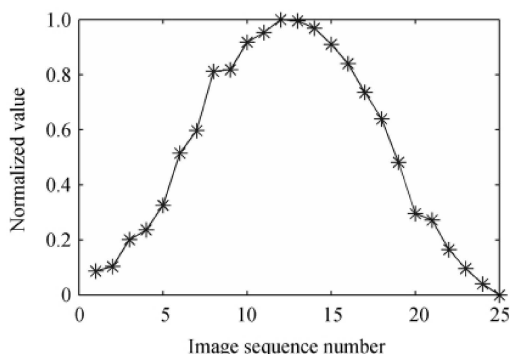


图 4 改进算法的评价结果

Fig. 4 Evaluation results of improved algorithm

一个好的调焦算法应该满足单峰性、无偏性、灵敏度高、计算量小等优点^[8-10]. 为了衡量改进算法的性能,将改进算法和阈值为 0 的传统 Brenner 算法做对比分析.

1) 单峰性和无偏性. 单峰性要求调焦函数在全量程内只有一个极值点,无偏性要求函数极值点位置就是正焦位置,这样可以保证调焦过程的正确. 阈值为 0 的传统 Brenner 算法和改进算法均具有一个极值点,曲线没有局部极值点,并且极值点位置就是正焦位置.

2) 灵敏度. 灵敏度高的评价算法能够正确区分正焦和轻微离焦. 由于改进算法采用差分结构,差分中的任何一项变化都会在评价结果中表现出来,具有较好的灵敏度. 为了精确描述和比较各种方法的聚焦灵敏度,分别计算各方法的聚焦灵敏度因子 s ^[13]. 聚焦灵敏度因子 s 的定义为

$$s = (2 \times F(i) - F(i+1) - F(i-1)) / 2 \quad (3)$$

式中 $F(i)$ 为序列图像中第 i 幅图像对应的清晰度评价值, i 为图像的序号.

根据聚焦灵敏度因子公式可以计算得到各个评价函数的平均灵敏度分别为: 阈值为 0 的传统 Brenner 算法为 0.03, 改进算法为 1.55. 改进算法的灵敏度高于传统的 Brenner 算法.

3) 计算量. 计算量小的评价函数可以实现调焦系统的实时快速聚焦. 对于大小为 $M \times N$ 的图像,

传统的 Brenner 算法近似需要 $M \times N$ 次实数乘法运算和 $M \times N$ 次实数减法运算,改进方法仅近似需要 $2 \times M \times N$ 次实数减法运算而不需要实数乘法. 改进算法并不增加实际系统的计算复杂度.

3 结论

传统 Brenner 算法是简单的空域梯度评价,但是它的评价结果依赖阈值的选取. 本文针对阈值的选取问题提出了一种改进算法,实验验证结果表明,改进算法可以有效地克服传统 Brenner 算子的缺陷. 改进的算法只是增加一个滤波模板,增加的滤波模板只增加一次减法运算,并不过多增加计算复杂度. 改进算法在具有好的单峰性和无偏性基础上,提高了灵敏度,可以用于基于图像的被动自动调焦技术中的图像清晰度评价.

参考文献

- [1] CHEN Guo-jin. Study on the auto-focusing technology of digital image and realization for an auto-focusing system[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
陈国金. 数字图像自动聚焦技术研究及系统实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [2] YU Chao, WANG Bo-xiong, ZHENG Han-qing, et al. Improved TennenGrad function for microscopic coarse autofocusing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(5): 784-790.
余超, 王伯雄, 郑汉卿, 等. 显微镜自动粗调焦的 TennenGrad 改进算法[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(5): 784-790.
- [3] LIANG Min-hua, WU Zhi-yong, CHEN Tao. Auto-focusing adjustment of theodolites by largest the gradient method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(12): 3016-3021.
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.
- [4] HU Feng-ping, CHANG Yi-lin, MA Yan-zhuo, et al. Development of video automatic focus method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1901-1906.
胡凤萍, 常义林, 马彦卓, 等. 视频自动聚焦的实现研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1901-1906.
- [5] CHEN Guo-jin, ZHU Miao-fen, SHI Hu-li, et al. Identification of image definition based on minimum isotropy wavelet[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 395-399.
陈国金, 朱妙芬, 施洪立, 等. 基于最小各向同性小波滤波的图像清晰度识别[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 395-399.
- [6] HAN Rui-yu, WANG Jin-jiang, NIE Kai, et al. Adaptive autofocus technique under different contrast [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 222-227.
韩瑞雨, 王晋疆, 聂凯, 等. 不同对比度下自适应的自动调焦新算法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 222-227.
- [7] ZHENG Yu-zhen, WU Yong, NI Xu-xiang. Research on automatic focusing in real time [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(4): 64-66.
郑玉珍, 吴勇, 倪旭翔. 实时自动对焦的研究[J]. *光电工程*, 2004, **31**(4): 64-66.
- [8] BAO Ge-tang, ZHAO Hui, TAO Wei. Algorithm's study on automatic focusing for image measurement technology [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, **39**(1): 121-124, 128.
鲍歌堂, 赵辉, 陶卫. 图像测量技术中几种自动调焦算法的对比

- 分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, **39**(1): 121-124, 128.
- [9] ZHAO Hui, BAO Ge-tang, 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与分析[J]. 光学精密工程, 2004, **12**(5): 531-536.
- [10] LI Qi, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai, *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.
- [11] FRANK R B, van LUCAS J V, HANS N, *et al.* Autofocusing in microscopy based on the OTF and sampling [J]. *Bioimaging*, 1994, **2**(4): 193-203.
- [12] ZHU Kong-feng, JIANG Wei, GAO Zan, *et al.* Focusing window choice and parameters determination in automatic focusing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 835-840.
朱孔凤, 姜威, 高赞, 等. 自动聚焦系统中聚焦窗口的选择及参数的确定[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 835-840.
- [13] WANG Qian, SONG En-min, XU Xiang-yang, *et al.* Autofocusing function for microscope image based on weighted neighborhood correlation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 166-171.
王倩, 宋恩民, 许向阳, 等. 基于加权邻域相关性的显微镜自动聚焦函数[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(1): 166-171.

An Improved Brenner Algorithm for Image Definition Criterion

WANG Jian^{1,2}, CHEN Hong-bin¹, ZHOU Guo-zhong¹, AN Tao¹

(1 *Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences; Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The image definition criterion is one of basic problems in passive auto-focusing technique based on digital image. The traditional Brenner Algorithm has a fast calculation speed, but the accuracy of evaluation result depends on the threshold value, and the Algorithm sensitivity is low. For this issue, an improved Algorithm is proposed. The improved function uses high pass filter and bandpass filter to evaluate the image, and overcomes the limitation of traditional Brenner Algorithm depending on the threshold value. In order to evaluate the improved Algorithm performance, the parameters of unimodality, accuracy, sensitivity, calculating cost are compared and analyzed. Compared with the traditional Brenner Algorithm, the experiments and analysis show that the improved Algorithm can meet unimodality, accuracy, and improve sensitivity and reduce calculating cost.

Key words: Image definition; Evaluation method; Brenner; Threshold; Sensitivity