

文章编号: 0253-2239(2007)01-0035-5

数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较^{*}

孙 杰 袁跃辉 王传永

(天津理工大学电子信息与通信工程学院, 天津 300191)

摘要: 图像聚焦判别函数的选择是自动图像测量中获取高质量图像的依据,对几种用于自动图像聚焦判别的数字图像处理算法进行了较全面的性能比较,定量分析了不同算法的计算速度、唯一性、准确性和灵敏度等。分析结果表明:梯度向量平方函数、拉普拉斯算法和二级梯度平方算法在单值性和灵敏度方面都较好;罗伯特(Robert)梯度算法和梯度向量模方算法函数的稳定性比较好。以上的图像聚焦判别函数特性分析结果对于图像自动测量所需要的自动调焦控制具有指导意义。

关键词: 数字图像处理; 自动聚焦; 自动图像测量; 评价函数; 聚焦函数

中图分类号: TN96 文献标识码: A

Comparison and Analysis of Algorithms for Digital Image Processing in Autofocusing Criterion

Sun Jie Yuan Yuehui Wang Chuanyong

(School of Electronic Information and Communication Engineering,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300191)

Abstract: The choice of the imaging focusing criterion function is the key of high-quality image acquiring in auto image measurement. The performances of several digital image processing methods used for autofocusing criterion are given. The focusing evaluation functions are compared and analyzed quantitatively through experiments in the aspects of calculation speed, unique value, precision and sensitivity. The results show that gradient square algorithm, Laplacian algorithm and second order gradient square algorithm have good behavior at the unique value and the sensitivity; and that both Robert algorithm and gradient mode algorithm have good behavior at the stability and calculation speed. These analysis results of image focusing criterion functions are useful for autofocusing in the automatic image measurement application.

Key words: digital image processing; automatic focusing; automatic image measurement; evaluation function; focusing function

1 引 言

自动图像测量技术可以代替人眼实现以图像为载体目标参量测量,而自动聚焦技术是自动完成图像测量并使测量结果精确可靠的保证,它作为视觉仪器研究的重点内容,为国内外众多领域的研究人员所重视^[1~3]。

实现图像自动聚焦可以采用测距法,即测量被测物体与成像面之间的距离,也可以采用图像灰度衬比度分析法实现。前一种方式称为主动方式,后一种称为被动方式^[4]。图像灰度衬比度判断可以使用光学

方法实现,也可以使用数字图像处理的聚焦评价函数方法实现。使用测距法和光学衬比度判断法进行自动聚焦操作已经相当成熟,但使用这两种方法的相机结构比较复杂,也不能在一些特殊的自动图像测量的场合使用,比如超出测距法分辨能力的近距离图像测量和微小物体的图像分析等。使用数字图像处理方法的聚焦评价操作是以所摄取图像中物体的清晰程度为判断依据。一个理想的聚焦评价函数应该具有灵敏度高、单值、无偏离、计算量小和较高的信噪比等特点^[5]。所谓灵敏度高就是需要判断的数据在聚焦

^{*} 天津市科委自然科学基金(023615211)和天津市教委自然科学基金(20010204)资助课题。

作者简介: 孙 杰(1961—),男,天津市人,教授,主要从事光学信息处理与数字图像测量方面的研究。

E-mail: sunjie@tjut.edu.cn

收稿日期: 2006-04-11; 收到修改稿日期: 2006-07-11

点附近要有明显的数值变化;单值就是所需要判断的极值点要单一;无偏离就是运算得到的聚焦点位置与实际测量的位置一致;计算量小就是运算简单,或者是运算时间短;高信噪比就是函数运算结果受无关内容的影响小。聚焦评价函数的特性与所选函数有关,本文对几种常用的使用图像处理算法的图像聚焦评价算法进行了分析比较,给出了各自相应的判别时间、灵敏度和单值性等结果。

2 聚焦评价函数

任何光学成像系统都可以等效为一个理想高斯成像系统。从牛顿成像公式可知,光学系统可以通过调节物距、像距或焦距中的任何一个或多个参量来实现物平面与像平面之间的共轭,即成像。共轭关系满足得越好,得到的图像就越清晰,否则相反。只有在正确调焦的情况下,图像各处的灰度衬比度才最强,这就是实现聚焦判断的理论依据^[6]。在自动图像测量中,物体平面和成像平面一般是固定的,这样通过调节成像透镜的位置可实现共轭成像。光学成像光路结构如图 1 所示。

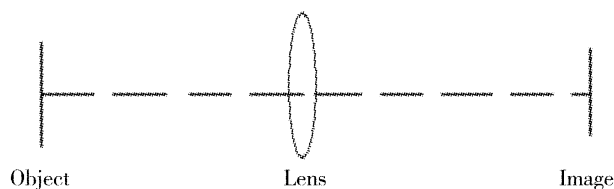


图 1 光学成像光路结构示意图

Fig. 1 Sketch of optical imaging

常用聚焦评价函数有如下几类:灰度梯度函数、信息熵函数、频域评价函数等^[5]。

2.1 灰度梯度函数

这类函数使用特定的处理法,用图像像素间的灰度差异来表征图像清晰度。假设图像中某点 (x, y) 处的灰度值为 $g(x, y)$,图像的规模为 $M \times N$ (M 列、 N 行)个像素,则灰度梯度判别函数有以下几种定义;

1) 灰度涨落变化函数:

$$F_1 = \sum_x^M \sum_y^N |g(x, y) - g_0|^2, \quad (1)$$

这是一种判断图像灰度起伏程度的方法,式中 g_0 是图像灰度的平均值,可表示为

$$g_0 = \frac{1}{MN} \sum_x^M \sum_y^N g(x, y), \quad (2)$$

2) 灰度绝对变化函数:

$$F'_1 = \frac{\sum_x^M \sum_y^N |g(x, y) - g(x_0, y_0)|}{g(x_0, y_0)}, \quad (3)$$

式中 $g(x_0, y_0)$ 为某参考像素点 (x_0, y_0) 处的灰度值。该评价函数与 F_1 比较类似,适于具有固定单一背景的图像对比。

3) 梯度向量模方函数:

$$F_2 = \sum_x^M \sum_y^N \{ [g(x+1, y) - g(x, y)]^2 + [g(x, y+1) - g(x, y)]^2 \}^{1/2}, \quad (4)$$

这是一个灰度变化梯度和的表达式,只选取了梯度标量数值信息作为灰度变化量描述。

4) 梯度向量平方函数:

$$F_3 = \sum_x^M \sum_y^N \{ [g(x+1, y) - g(x, y)]^2 + [g(x, y+1) - g(x, y)]^2 \}, \quad (5)$$

此函数与梯度向量模方函数思路相同,只是用梯度平方和作为图像灰度变化判断。

5) 罗伯特梯度函数:

$$F_4 = \sum_x^M \sum_y^N \{ |g(x, y) - g(x+1, y+1)| + |g(x+1, y) - g(x, y+1)| \}, \quad (6)$$

此评价函数使用了被判断点及其外沿三个像素点的灰度信息。

6) 拉普拉斯梯度函数:

$$F_5 = \sum_x^M \sum_y^N [4g(x, y) - g(x, y+1) - g(x, y-1) - g(x+1, y) - g(x-1, y)]^2, \quad (7)$$

此评价函数使用了被判断点及其周围四个像素点的灰度信息。

7) 二级梯度平方函数:

$$F_6 = \sum_x^M \sum_y^N [G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)], \quad (8)$$

$$\begin{aligned} G_x(x, y) &= [g(x+1, y-1) + 2g(x+1, y) + g(x+1, y+1)] - \\ &\quad [g(x-1, y-1) + 2g(x-1, y) + g(x-1, y+1)], \\ G_y(x, y) &= [g(x-1, y+1) + 2g(x, y+1) + g(x+1, y+1)] - \\ &\quad [g(x-1, y-1) + 2g(x, y-1) + g(x+1, y-1)], \end{aligned} \quad (9)$$

此评价函数使用了被判断点周围八个像素点的灰度信息。

2.2 图像信息熵函数

假设图像各处是灰度独立的,在不考虑像素几何位置的情况下,按信息学香农(Shannon)熵的定义,图像的信息熵可写为^[7]

$$F_7 = - \sum p_i \log_b(p_i), \quad (10)$$

式中 p_i 为像素某灰度值表征的信息出现的概率,一般 $b = 2$,相应的单位是比特(bit),也可以取以 e 为底的对数,相应的单位是奈特(nat)。在大多数的计算中,灰度值的信息概率定义为该灰度值在灰度直方图中出现的概率。

2.3 频域评价函数

这种图像清晰度算法首先是通过傅里叶变换将空间位置分布的灰度图像变成相应的空间频率分布的表示,然后选取空间频率分布中高频成分的大小作为图像是否清晰的判断依据。其相应函数表示为

$$F_8 = \sum_X^M \sum_Y^N G(X,Y) - \varphi, \quad (11)$$

式中

$$G(X,Y) = \sum_X^M \sum_Y^N g(x,y) W_{MN}^{xyXY}, \quad (12)$$

其中 W_{MN}^{xyXY} 是函数 $g(x,y)$ 的二维傅里叶变换矩阵元素, φ 是高通滤波的阈值,一般取值为 0。 (x,y) 是图像空间坐标的变量, (X,Y) 是图像在对应空间频域坐标中的变量。

2.4 其他评价函数^[8,9]

与傅里叶变换类似的还有小波变换方法,该方法可以在多种空间分辨力下对图像进行分析。与傅里叶变换相比,小波变换方法的应用范围广且灵活性高。但新算法在概念和使用上都处于研究阶段,故本文仅对前三类图像聚焦评价算法进行分析比较。

3 运算复杂度分析

3.1 相关主要设备参数

光学镜头: SSE0412NI 1/3" (8.47 mm) 4.0 mm, F1.2 固定光圈 CS 接口。

图像采集卡: OK_C20。

数字彩色: CCD: 752 pixel × 582 pixel, 1/3" (8.47 mm) 成像靶面。

计算机: CPU Intel Pentium(R) IV 2.4 GHz, 256 MB 内存。

以下数据均是在此硬件基础上测得的。

3.2 聚焦函数运算复杂度的分析

实验中使用 CCD 摄像机对一本书的封面(见图 2)进行拍照,通过控制调焦镜头的前后纵向位置来实现图像的调焦,前后纵向移动的步进距离为 0.023 mm。在聚焦点位置前后分别采集 5 个欠焦和 5 个过焦图像。加上聚焦良好图像,共得到 11 幅图像。采集的图像大小为 768 pixel × 576 pixel。本文的数据分析以该图像数据为依据,并将图像序号或步进序号按由最远的欠焦状态经过聚焦状态后,直到过焦状态编排。

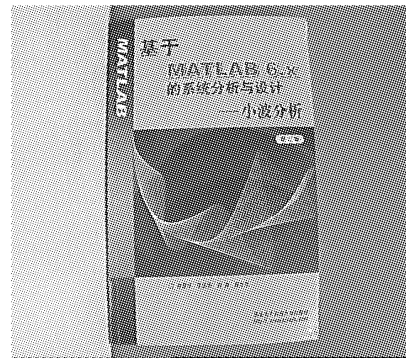


图 2 测试目标图像

Fig. 2 The image of tested object

各类处理和运算所需要的时间在不同等级的计算机上是不同的,但在同一台计算机上,相对复杂的运算需要的计算时间肯定要比简单的运算时间长。在理论上,为了比较各种运算复杂程度的差异,我们用相应运算对应的加法次数来表示运算的复杂性。公式中涉及的运算时间按递增顺序依次为:加法/减法、乘法/除法、平方运算、开方运算、对数运算和图像灰度值的排序与比较运算。这样上面各聚焦评价函数表达式的运算复杂度按升序排列依次为: F_1 、 F_3 、 F_5 、 F_2 、 F_6 、 F_4 、 F_8 、 F_7 。这种排列顺序也为具体图像的运算实验所证实。

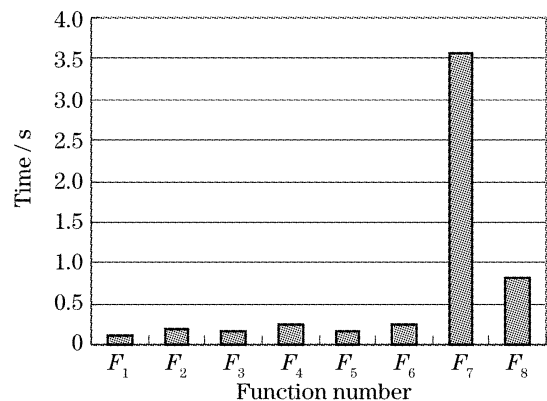


图 3 不同算法所用时间

Fig. 3 Time consumed with of different algorithms

表 1 是利用各算法对 8×8 个数据点进行运算的次数对照表。

表 1 运算次数对照表

Table 1 Comparison of operation times

Algorithm	Focusing criterion function (operation times)							
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
Addition /Subtraction	127	189	189	189	144	396	256	448
Multiplication /Division	2				36	144	512	512
Square	64	126	126		36	72		
Logarithm							257	
Square root		63						
Absolute value	64			126				

由于计算机有随机的各种外部和内部的中断请求,所以即使是相同内容的计算,每次运行所需要的时间也不尽相同。作者以 5 次运算的平均运算时间作为算法速度的评价参量。表 2 给出了按公式 $F_1 \sim F_8$ 运算所需要的平均时间。图 3 是对应的图形表示。

表 2 不同公式运算时间

Table 2 Calculation time of different formula

Focusing criterion function	Consumed time /s	Focusing criterion function	Consumed time /s
F_1	0.1202	F_5	0.1545
F_2	0.1809	F_6	0.2381
F_3	0.1517	F_7	3.5593
F_4	0.2469	F_8	0.8114

4 灵敏度及单值性分析

为比较分析方便,将聚焦评价函数的数值进行了归一化处理,即将函数运算结果的最大值取为 1。各函数计算结果如图 4 所示。图中横坐标为采集的图像序列号,纵坐标为归一化函数值。

灵敏度高在曲线中的表现为曲线变化陡峭^[10]。由图 4 中曲线可知,灵敏度由高到低依次为: F_5 、

F_6 、 F_3 、 F_8 、 F_4 、 F_2 、 F_1 、 F_7 。在目测聚焦效果好的位置,八个函数都存在极值,这说明几个函数都在焦平面有局部单值性,但从整个可调节范围来分析, F_1 和 F_7 有多个极值,所以图 4 中曲线峰值的单值性除 F_1 、 F_7 外,其他都符合单值判断要求。灵敏度高的函数曲线其抗干扰能力也很强,所以信噪比的高低顺序和灵敏度顺序一致。

总之,从实验数据比较来看,聚焦评价函数综合性能高低依次为: F_5 、 F_6 、 F_3 、 F_8 、 F_4 、 F_2 、 F_1 、 F_7 。数据统计见表 3。

表 3 聚焦评价函数性能比较表

Table 3 Performance comparison of different evaluation functions

Focusing criterion function	Consumed time	Unique value	Sensitivity
F_1	G	B	B
F_2	M	G	M
F_3	G	G	G
F_4	B	G	M
F_5	G	G	G
F_6	M	G	G
F_7	B	B	B
F_8	B	G	G

符号表示: G: 好; M: 中等; B: 不好。

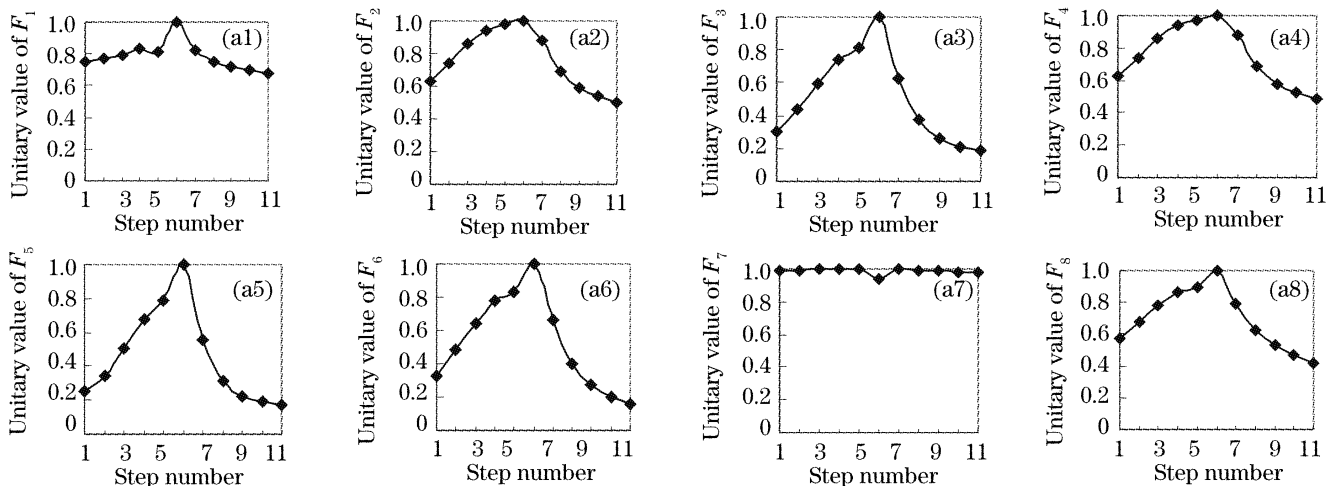


图 4 归一化评价函数分布图。(a1)~(a8)分别为 $F_1 \sim F_8$ 的计算结果

Fig. 4 Distribution of normalized evaluation functions. (a1)~(a8) corresponding to $F_1 \sim F_8$

5 结 论

本文使用数字图像处理方法对几种聚焦评价函数进行了综合比较,得出由图像灰度值大小定义的信息熵在聚焦判别时不理想,运算时间也长;图像灰度涨落变化函数虽然计算时间短,但在聚焦位置附近其判断数值有抖动,不存在唯一性,故也不适合做自动聚焦判断;梯度向量模方函数与罗伯特梯度函数变化较为平稳,但后者运算速度比前者差;傅里叶频域分析法运算时间较长,但单值性和灵敏度都较好;梯度向量平方函数、拉普拉斯梯度函数和二次梯度平方函数在灵敏度和单值性方面都比较好,只是二次梯度平方函数的运算时间稍微长。

参 考 文 献

- 1 Zong Guanghua, Sun Minglei, Bi Shusheng *et al.*. Research on autofocus technique in micro-vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1225~1232 (in Chinese)
宗光华, 孙明磊, 毕树生 等. 显微视觉自动聚焦研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1225~1232
- 2 Liang Rong, Li Dacheng, Cao Mang *et al.*. Common path laser heterodyne interferometer for on-line measuring surface roughness[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 958~961 (in Chinese)
梁 嵘, 李达成, 曹 芒 等. 在线测量表面粗糙度的共光路激光外差干涉仪[J]. *光学学报*, 1999, **19**(7): 958~961
- 3 Chen She, Meng Yonghong, Jin Gang. Study on the autofocus evaluation function in ellipsometric imaging system [J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 923~929 (in Chinese)
陈 涉, 孟永宏, 靳 刚. 椭圆偏光学显微成像系统聚焦评价函数的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 923~929
- 4 Yuan Yukai. Automatic focusing method of optical system[J]. *Infrared*, 2004, **6**: 15~21 (in Chinese)
原育凯. 光学系统的自动聚焦方法[J]. *红外*, 2004, **6**: 15~21
- 5 Qu Yufu. Research of vision aiming probe[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001. 20~28 (in Chinese)
屈玉福. 视觉瞄准测头的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001. 20~24
- 6 Guo Yanzhen, Qiu Zhongming, Li Xin *et al.*. A method of tuning focus for image measurement technology[J]. *J. Xi'an University of Technology*, 2001, **17**(1): 40~42 (in Chinese)
郭彦珍, 邱宗明, 李 信 等. 图像测量技术中一种调焦的判别方法[J]. *西安理工大学学报*, 2001, **17**(1): 40~42
- 7 Zhu Zhengtao, Li Shaofa, Chen Huaping. Research on auto-focused function based on the image entropy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(5): 537~542 (in Chinese)
朱铮涛, 黎绍发, 陈华平. 基于图像熵的自动聚焦函数研究[J]. *光学·精密工程*, 2004, **12**(5): 537~542
- 8 J. Widjaja, S. Jutamulia. Wavelet transform-based autofocus camera systems [C]. The 1998 *IEEE Asia-Pacific Conference Circuits and Systems* on 24~27 Nov. 1998. 49~51
- 9 Huang Jianqi, Feng Huajun, Xu Zhihai *et al.*. The application of edge-enhance algorithm and wavelet analysis in auto-focus [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(10): 932~936 (in Chinese)
黄剑琪, 冯华君, 徐之海 等. 边缘特征增强算法和小波分析在精确聚焦中的应用[J]. *光子学报*, 2000, **29**(10): 932~936
- 10 Qu Yufu, Pu Zhaobang, Zhao Huijie *et al.*. Influence factor analysis of sensitivity of focus criteria function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 902~906 (in Chinese)
屈玉福, 浦昭邦, 赵慧洁 等. 调焦评价函数灵敏度的影响因素分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 902~906