文章编号 1004-924X(2004)05-0531-06

图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析

赵 辉,鲍歌堂,陶 卫
(上海交通大学 信息检测技术及仪器系,上海 200030)

摘要:给出了几种常用图像测量中自动调焦算法的对比分析,并分别在不同照明方式和不同背景条件下对主要的调焦函数特性参数进行测试,得到了调焦函数的实用性能的客观评价。实验结果表明:在透射照明条件下,灰度梯度类调焦函数特性均较好。其中 Variance 函数以及灰度变化率和函数具有较大的调焦范围,且近似为线性变化,但是灵敏度较低,因此适于大范围粗调焦;Laplacian 函数和 Tenengrad 函数灵敏度高,稳定性好,但调焦范围小,因此适合于小范围精确调焦。在反射照明条件下,只有 Tenengrad 函数和 Brenner 函数仍然保持单峰性,但灵敏度明显下降。当存在较复杂背景时,调焦函数普遍失效。因此在实际测试中,应当优先选择透射光照明,尽可能少用反射照明,而且应尽可能避免背景的干扰。

关 键 词: 图像测量;自动调焦函数;算法
中图分类号: TP319 **文献标识码**: A

Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement

ZHAO Hui, BAO Ge-tang, TAO Wei

(Department of Instrumentation Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Several general automatic focusing functions for imaging measurement are put forward, compared and analyzed in defail. The main parameters of automatic focusing, including sensitivity, consistency, stability and calculating speed, were tested and validated through a series of experiments under different conditions, such as different lighting or different background. The results of experiments show that in the background lighting, the gray functions all have better performance than others, the Variance function and the sum of gray-change function have a large focusing range, good linearity and low sensitivity, so they are propitious to focusing in large range with lower accuracy. The Laplacian and Tenengrad functions both have sharp peak, good sensitivity and small focusing range, which make them applicable to accurate focusing in small range. But in reflection lighting, only the Tenengrad and Brenner functions have fine single peak and low sensitivity. All of these focusing functions will be disabled when the complex backgrounds exist. So, when it comes to practical application, background lighting should be chosen instead of reflection lighting, also interference coming from background should be reduced to minimum level.

收稿日期:2004-07-05;**修订日期**:2004-08-24.

Key words: imaging measurement; automatic focusing function; algorithm

1 引　言

在图像测量中,图像是否正确聚焦,反映在空域上是图像的边界及细节部分是否清晰,在频域上则是图像的高频分量是否丰富。前者可以通过对图像进行微分来获取图像的边缘及细节信息,后者可以对图像进行 FFT 来获取图像的频谱信息。通常,判断图像聚焦与否是通过焦距评价函数(即调焦函数)来衡量的,因此调焦函数的好坏直接影响着调焦的精度和速度。目前国内外学者提出了许多调焦函数,但不同的调焦函数大都只能对某一种或几种图像具有较好的效果。由于图像测量对象比较复杂和多变,一个函数无法适应所有测量场合。本文对目前常见的 10 几种调焦算法进行深入的对比分析和实验研究,在以往的实验研究基础上,针对不同照明和不同背景的条件下调焦函数的主要性能与特点进行实验分析和评价,以便为这些函数的正确使用提供依据。

2 调焦判别原理及调焦函数综述

对于光学系统,存在调节像距、物距、焦距来达到物像共轭关系,这就需要一种判别调焦是否已满足物像共轭关系的方法,称之为调焦判据[1]。根据牛顿公式可知,物离共轭面越近,清晰度越好;越远,清晰度越差。也就是只有在正确调焦的情况下,图像各点间的灰度对比度最强;调焦偏差越大,灰度对比度越弱。这就是实现调焦判别的理论依据。依据此原理,许多人从不同的角度对图像清晰度进行了大量的研究工作,提出了各自的评价函数。

目前国内外提出的调焦函数大致可以归结为灰度梯度函数、频域函数、信息学函数和统计学函数几类[3-5],见图 1,其中频域类、信息学和统计学类调焦函数因为在调焦过程中对环境的稳定性要求较高,所以调焦曲线非常不理想,大多都不能正确地表达焦点的位置,在实验中未予以考虑。灰度梯度函数利用对图像灰度的各种处理方法来表征图像清晰度。由于灰度梯度类调焦函数的值采用图像相邻像素间的灰度差(差分)来计算,微分运算的作用可以消除背景噪声的影响,能有效抑制外界条件(如背景噪声、光源波动等)对图像的整体影响,能大致达到调焦函数所具有的特征。因此灰度类函数应用最广,适应性最强。但由于微分的放大作用,灰度类函数也容易受到脉冲噪声的影响。

灰度梯度函数包括绝对方差函数、Roberts 梯度和函数、梯度向量模方函数、梯度向量平方函数、Brenner 函数、Laplacian 函数、Tenengrad 函数、Variance 函数、灰度变化率之和函数等[3-9]。

图 1　各种常用调焦函数

Fig. 1　Usual focusing functions

灰度梯度函数场包括以下常见形式[3-9]:

(1) 绝对方差函数:

$$F = \sum_x \sum_y | g(x,y) - g(x+1,y) | , \tag{1}$$

(2) Brenner 函数:又称为梯度滤波器法,它对相邻近的像元灰度进行平方求和:

$$F(k) = \sum_x \sum_y [g(x+k,y) - g(x,y)]^2 , \tag{2}$$

(3) Roberts 梯度和函数:

$$F(k) = \sum_x \sum_y \{ | g(x,y) - g(x+1,y+1) | +$$

$$| g(x+1,y) - g(x,y+1) | \} , \quad (3)$$

Roberts 梯度和函数实际上以某一点为中心上的连续梯度的近似,处理边缘特性时候比绝对方差函数和 Brenner 函数要好。

(4) 梯度向量模方函数:

$$F(k) = \sum_x \sum_y \{ [g(x+1,y) - g(x,y)]^2 + [g(x,y+1) - g(x,y)]^2 \}^{\frac{1}{2}} , \quad (4)$$

(5) 梯度向量平方函数:

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

(6) Laplacian 函数:

$$F(k) = \sum_x \sum_y \{ 4g(x,y) - g(x,y+1) - g(x,y-1) - g(x+1,y) - g(x-1,y) \}^2 , \quad (6)$$

Laplacian 函数是二级微分算子,它对孤立噪声点的相应是对阶越边缘相应的 4 倍,对单像素线条的相应是对阶越边缘相应的 2 倍,对线端及斜向边缘的相应大于垂直及水平走向边缘的相应。所以它不及 Roberts 梯度和函数和梯度向量模方函数。

(7) Tenengrad 函数:它利用 Sobel 算子来估计图像在水平方向和垂直方向的梯度,为使图像边缘的梯度放大,对梯度进行平方运算,其表达式为:

$$F(k) = \sum_x \sum_y [S(x,y)]^2 , \quad (7)$$

其中:$S(x,y) = \sqrt{G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)}$

$S(x,y) > T$

Tenengrad 函数是先加权平均然后再微分,分别对水平和垂直方向进行模板运算,对噪声有一定的抑制能力。随着窗口的放大,噪声抑制能力更加明显。

(8) Variance 函数:与标准差函数实质是一样的,它利用图像数据的标准偏差作为调焦评价函数。其表达式为:

$$F(k) = \sum \sum [g(x,y) - u]^2 , \quad (8)$$

其中:$u = \frac{1}{M \times N} \sum_x \sum_y g(x,y)$

Variance 函数又称均方差函数,在调焦过程中,照明系统的波动只能使图像的灰度整体发生平移,而对灰度分布曲线的形状,即均方差数影响很小。因此具有抗亮度变化干扰的性质。但图像尺度较大时,处理速度会受到一定影响。

(9) 灰度变化率之和函数:利用图像离焦时,图像模糊,各象素的灰度值变化平缓,像素灰度值之间变化小;当越接近正焦时,各像素值变化急剧,像素灰度值之间变化大。取一个基准灰度值 (x,y),其他像素 (x,y) 相对于基准的变化率:

$$graychange[i] = | g(x,y) - g(x_0,y_0) | / g(x_0,y_0)$$

则灰度变化率之和为

$$Sum = \sum_{i=0}^{M \times N - 1} graychange[i] , \quad (9)$$

灰度变化率之和函数是一种基于像素数的评价函数,它针对像素进行运算,体现了图像像素的有效特信息,而没有考虑图像的区域相关性,所以他的优点是处理速度快,缺点是抗干扰性不好,容易受图像中脉冲噪声的影响,而且当系统照明亮度发生变化时,函数值波动较大,容易产生误调焦。

对于单目测量系统,需要选取合适的调焦函数作为调焦判别依据。一个理想的调焦函数应如图 2 所示[2],要具有以下特性:无偏性、单峰性、灵敏度高、信噪比好、计算量小等特性。

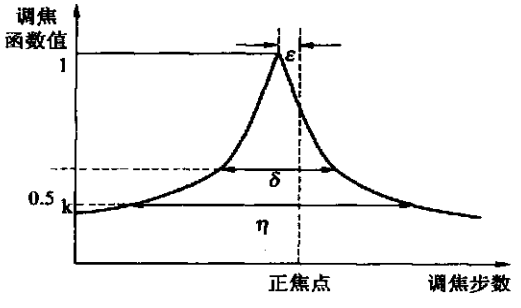

图 2　理想调焦函数曲线
Fig. 2　Ideal curve of focusing function

无偏性:要求调焦函数能够正确反映焦点的位置,不同调焦函数、不同条件下,调焦函数的焦点应不变。图 2 中 ε 就表示无偏性,ε 值越小越好,$\varepsilon = 0$ 为理想情况,说明该调焦系统没有系统误差。

半宽度:曲线的半宽度是指在函数最大值 50 %时的曲线宽度。这一指标主要描述了曲线的尖锐程度,一般来讲,具有比较尖锐峰值的曲线可以使系统更加正确地定位于最佳物面位置;而不尖锐的曲线将增大理想对焦位置的定位不确定度。此外,半宽度小说明了函数在较大离焦时具

有较大的斜率,意味着具有较高的调焦灵敏度、判断离焦的高可靠性。图 2 中的 δ 就表示半宽度,理想调焦函数的半宽度很小。

单峰性:调焦函数曲线形状应呈现单峰,即在全量程内只有一个极值点,这样就能够反映离焦极性,从而保证调焦过程的正确性。

一致性:也可以称为准确性或无偏性,即不同调焦函数的极值点与真实焦点的一致程度。

灵敏度:是指在调焦函数的有效调焦范围内的最大斜率。灵敏度越高,调焦精度越高。

信噪比:代表了调焦函数的抗干扰能力,也是调焦函数稳定性、可靠性指标之一。

计算量:调焦函数的计算量大小直接影响调焦速度和动态响应。

抗干扰性:如果在调焦过程中,环境的个别参数发生了变化(例如光源的发光强度),调焦程序不应被干扰。

3　实验结果与分析

为了对各个调焦函数的调焦性能进行客观的评价分析,分别在不同照明方式和不同背景条件下,对以下 9 种调焦函数进行试验测试:

(1)灰度变化率之和函数。(2)梯度向量平方函数。(3)梯度向量模方函数。(4)Brenner 函数。(5) Roberts 函数。(6)绝对方差和函数。(7) Variance 函数。(8) Laplacian 函数。(9) Tenengrad 函数。

测试方法如下:采用同一组图像进行处理,该组图像是对同一目标,在清晰成像位置附近,每隔 10 μm 采集一幅,共得 85 幅图像,总距离 850 μm。照明方式分别采用透射光和反射光,视场分为有背景和无背景两种,其测试图像如图 3 所示。

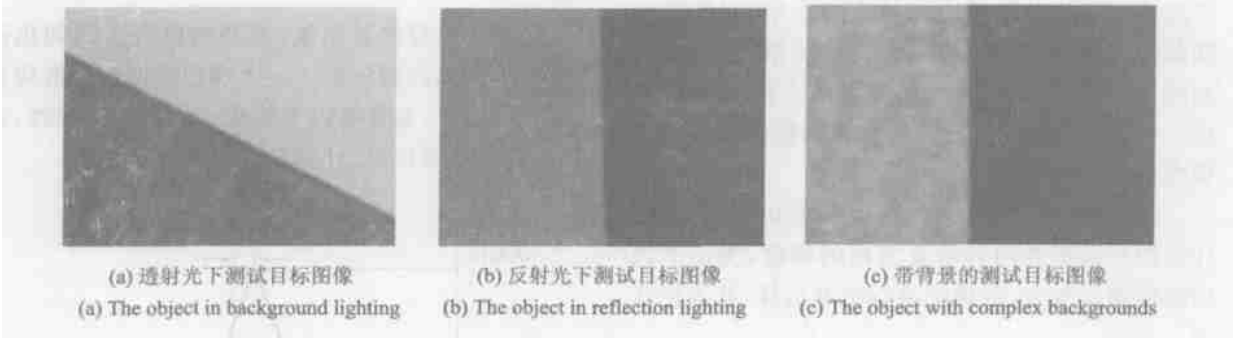

图 3　测试目标图像

Fig. 3　Images of the objects

3.1　投射照明条件下调焦函数特性测试

采用透射方式进行照明(见图 3a),在无干扰背景条件下的测试各个调焦函数值,结果见图 4。

从图 4 中可以看出:灰度变化率之和函数(1)、梯度向量平方函数(2)、Brenner 函数(4)、Roberts 梯度函数(5)、Variance 函数(7)、Laplacian 函数(8)以及 Tenengrad 函数(9)都具有平滑的形状,而且只有一个极值点,符合要求,可以用于自动调焦。而梯度向量模方函数(3)和绝对方差函数(6)的曲线平滑性相对较差,出现剧烈波动,存在多个极值点,容易产生误调焦,因此不能使用,应舍弃。

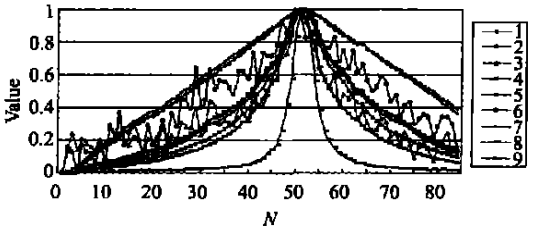

图 4　透射照明下调焦函数特性曲线

Fig. 4　Performance curves of focusing functions in background lighting

从图 4 中还可以看出:灰度变化率和函数(1)和 Variance 函数(7)具有较大的调焦范围,而且

近似为线性变化,但是灵敏度较低,因此适于大范围粗调焦。Laplacian 函数(8)和 Tenengrad 函数(9)峰顶宽度相对较窄,因此调焦范围较小,但灵敏度高,因此适合于小范围精确调焦。Roberts 梯度函数(5)、梯度向量平方函数(2)和 Brenner 函数(4)的调焦范围和灵敏度居中,因此适于中等范围的自动调焦。

3.2　透射照明条件下调焦范围特性测试

采用透射方式进行照明(见图 3a),在无干扰背景条件下的测试单向离焦时各个调焦函数值,测试结果见图 5。

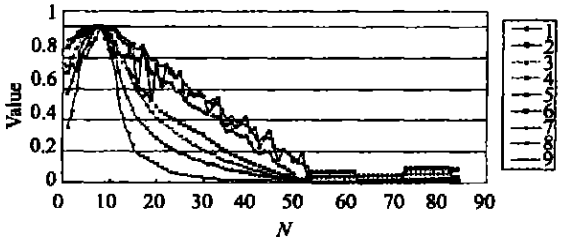

图 5　透射照明下调焦范围测试曲线

Fig. 5　Range testing curves of focusing functions in background lighting

从图 5 可以看出,随着目标与焦点的距离逐渐增大,所有调焦函数的数值都趋于一个很小的值,并存在一定的小幅波动[6]。这就意味着所有调焦函数都具有各自的调焦范围,并不能涵盖很广的区域。其中的灰度变化率之和函数(1)、梯度向量模方函数(3)、绝对方差函数(6)、Variance 函数(7)有着较大的调焦范围,在目标远离焦点一定距离之后,曲线斜率变化很小;Roberts 梯度和函数(5)、梯度向量平方函数(2)、Brenner 函数(4)具有适度的调焦范围,在目标远离焦点一定距离之后,曲线斜率变化相对比较适中;Laplacian 函数(8)和 Tenengrad 函数(9)虽然具有一定的调焦范围,但是在目标远离焦点一定距离之后,曲线斜率急剧变化,仍不能用作自动调焦。因此在自动调焦过程中,必须选用合适的调焦评价函数,以便保证目标处于上述调焦函数的"有效调焦范围"之内。

3.3　反射照明条件下调焦函数特性测试

采用反射方式进行照明(见图 3b),在无干扰背景条件下的测试结果见图 6。

由图 6 可以看出,在反射照明条件下上述各调焦函数的特性出现极大变化,其中只有梯度向量平方函数(2)、Brenner 函数(4)、Roberts 梯度和函数(5)、Tenengrad 函数(9)仍然保持相对比较好的单峰性外,其他调焦函数均失去单峰性,产生较大的波动。其中灰度变化率之和函数(1)波动最为剧烈,梯度向量模方函数(3)、绝对方差函数(6)、Variance 函数(7)、Laplacian 函数(8)次之,因此不能有效进行调焦。而且反射照明条件下梯度向量平方函数(2)、Brenner 函数(4)、Roberts 梯度和函数(5)、Tenengrad 函数(9)的灵敏度也低于投射照明条件下的灵敏度。

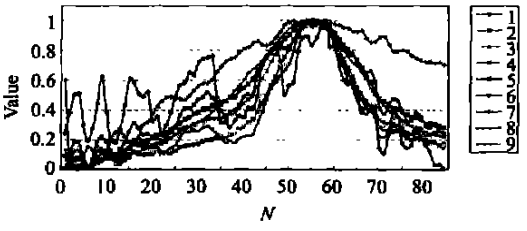

图 6　反射照明下调焦函数特性曲线

Fig. 6　Performance curves of focusing functions in reflection lighting

将图 6 与图 4 对比可知,在透射光下可以有很好特性的调焦函数,在反射光下却发生了改变。即使采用面阵二极管等均匀光源来照射,也无法产生较好效果。个别调焦函数虽可以正常工作,但灵敏度下降。由此证明,反射光对调焦函数的影响较大,在实际测试中,尽可能少用反射照明,而优先选择透射光照明。

3.4　背景对调焦函数的影响

采用透射方式进行照明,同时在目标背后增加其他背景物(见图 3c),在不同离焦位置上测试各个调焦函数值,结果见图 7。

从图 7 可以看出,即使在透射光照射条件下,所有调焦函数也受背景的影响[7-8],使函数曲线产生一定波动。其中,灰度变化率和函数(1)、绝对方差和函数(6)、Variance 函数(7)、Laplacian 函数(8)波动最大,曲线出现多峰性,不适于调焦;Brenner 函数(4)峰值点位置发生了较大的偏移,将对调焦精度产生影响;梯度向量平方函数(2)、梯度向量模方函数(3)、Roberts 函数(5)、Tenengrad 函数(9)曲线特性波动略小些,但曲线右侧出现一段平台段,属于盲区。

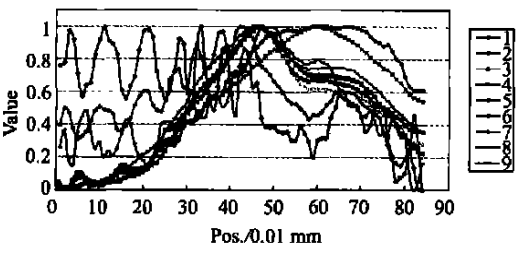

图 7　受背景影响下调焦函数特性曲线

Fig. 7　Performance curves of focusing functions with complex background

因此,当背景存在较复杂情况时,对自动调焦将产生严重影响。因此,建议测量时应尽可能保证目标背景的"纯净"。

4　结　论

根据上述试验测试,可以得出以下结论:

(1) 在不同照明方式和不同背景下,调焦函数表现出不同的特性。在适于这些调焦函数是,必须考虑到实际应用条件,分别选用不同的调焦函数。同时应对测量系统的光源提出更高要求。

(2) 在透射照明条件下,灰度梯度类调焦函数特性均较好。其中 Variance 函数以及灰度变化率和函数具有较大的调焦范围,而且近似为线性变化,但是灵敏度较低,因此适于大范围粗调焦。Laplacian 函数和 Tenengrad 函数调教范围小,灵敏度高,稳定性好,因此适合于小范围精确调焦。

(3) 在反射照明条件下,各调焦函数的特性出现极大变化,只有 Tenengrad 函数和 Brenner 函数仍然保持单峰性外,其他调焦函数均失去单峰性,而且反射照明条件下 Tenengrad 函数和 Brenner 函数的灵敏度低于投射照明条件下的灵敏度。因此在实际测试中,尽可能少用反射照明,而优先选择透射光照明。

(4) 当存在较复杂背景时,调焦函数普遍失效,调焦函数出现多峰性或平台段。因此,建议测量时应尽可能保证目标背景的"纯净",避免背景的干扰。

参考文献:

[1] 郭彦珍,邱宗明. 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.
GUO Y Z, QIU Z M. A method of tuning focus for image measurement technology [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2001, 17(1): 40-42 (in Chinese).

[2] 屈玉福. 视觉瞄准测头的研究[D]. 哈尔滨工业大学,2001.
QU Y F. *Research of vision aiming probe*[D]. Thesis of Harbin Institute of Technology,2001. (in Chinese)

[3] 王健民. 二维图像测量机及图像式大尺寸弧长在线测量系统的研究[D]. 哈尔滨工业大学,1998.
WANG J M. *Research of 2-D image measuring machine and on-line measuring system for large size arc-length*[D]. Thesis of Harbin Institute of Technology,1998. (in Chinese)

[4] 邱胜根,周杰,刘旭. 阵列像素器件投影显示系统中自动对焦评价函数研究[J]. 光学学报, 2004, 24(4):464-469.
QIU S G, ZHOU J, LIU X. Research of sharpness evaluation function in array pixel device projection display's auto-focusing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(4):460-464. (in Chinese)

[5] 徐洁, 张之江, 陆林海. 靶丸定位系统中的图像处理[J]. 光学 精密工程,2001,9(6):568-571.
XU J, ZHANG ZH J, LU L H. Image processing for the automatic positioning system of pellet target[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001,9(6):568-571. (in Chinese)

[6] KHARITONONKO I, ZHANG X. Digital focus detector for mobile video communications[C]. *IEEE*. 1995.

[7] HOSHINO DAIGO, YAMAUCHI TAKAHIRO. Detection of actual focus variations by focus automatic measurement [J]. *SPIE*,2003,540:861-870.

[8] OSAMU I. Optical array imaging system with improved focusing function[J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communication sand Computer Sciences*, 1993,76(12):2108-2113.

[9] 曹茂永, 孙农亮, 郁道银. 离焦模糊图像清晰度评价函数的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3):259-261.
CAO M Y, SUN N L, YU D Y. Study on clar ity-eva lua t ion-funct ion of out-of-focus blurred image[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(3):259-261. (in Chinese)

作者简介:赵辉(1965-),男,辽宁阜新人,上海交通大学信息检测技术及仪器系教授,博士生导师,主要研究方向为现代传感技术和视觉检测技术。E-mail: huizhao@sjtu.edu.cn