

文章编号: 0253-2239(2005)07-902-5

调焦评价函数灵敏度的影响因素分析

屈玉福¹ 浦昭邦² 赵慧洁¹ 刘国栋² 庄志涛²

(¹ 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)
(² 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 哈尔滨 150001)

摘要: 调焦评价函数对离焦图像的灵敏度直接影响着自动调焦的精度。许多对调焦函数性能研究中,都只是对各个不同函数的灵敏度相互比较,忽略了调焦评价函数的灵敏度不仅和函数本身有关,还和调焦选择区域大小以及图像的空间频率等参量有关的问题。从成像原理基本公式推导出调焦评价函数灵敏度的数学模型。然后根据公式得出在光学系统的焦点附近,调焦评价函数的灵敏度与图像的空间频率成高次正比关系,与调焦区域的面积成线性正比关系,与照明光源的波长和光学系统空间截止频率成二次反比关系。最后实验证明理论分析的正确性。从而为实践中的自动调焦系统设计提供理论指导,以便有目的地选择和控制在调焦系统的各个参量进一步提高自动调焦精度。

关键词: 光学计量; 图像式测量; 自动调焦; 调焦评价函数; 灵敏度

中图分类号: TN96 文献标识码: A

Influence Factor Analysis of Sensitivity of Focus Criteria Function

Qu Yufu¹ Pu Zhaobang² Zhao Huijie¹ Liu Guodong² Zhuang Zhitao²

(¹ College of Instrument Science and Photo-Electricity Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)
(² Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The precision of auto-focus system has been affected directly by the sensitivity of focus criteria function. In many researches about performance of focus criteria functions, the sensitivity of each different function is commonly compared, but ignoring that the sensitivity of focus criteria function is not only connected with the function itself but also with the parameters, such as area size selected by focus and the spatial frequency of image. Sensitivity of focus criteria function is firstly deduced from the basic function of the imaging theory. Then according to the function, conclusion is drawn near by focus of optical system that the sensitivity of focus criteria function is directly high-order proportional to relation with the spatial frequency of image and linear with the size of focus-area, and inversely proportional to the wavelength of the lighting power and spatial cutoff frequency of optics system. The experiments demonstrated that the theoretical analysis is correct. To some purpose it can provide theoretical guide to the design of auto-focus system and select clearly and control each parameter of focus system to further enhance the precision of autofocus.

Key words: optical metrology; image measurement; autofocus; focus criteria function; sensitivity

1 引 言

主动式自动调焦方法由于其结构简单,易于实现,成为目前合成孔径雷达和图像式显微镜的通用调焦方法^[1~8]。为了能准确地从光学系统的成像质量来获得离焦信息,很多学者做了大量的研究,从灰度梯度、频域、空间矩、小波、信息学和统计概率的角度提出几十种调焦评价函数对图像清晰度进行评

价^[9~11]。为评价各个函数的调焦性能, Groen 等^[12~14]认为一个理想的调焦函数应该具有灵敏度高、单调范围宽、无偏离和较高的信噪比等特性,他们依据以上理想调焦函数的性能要求对不同的调焦评价函数进行了性能对比分析,但这些研究忽略了一个函数的调焦特性不仅和函数本身有关系,还和调焦选择参量以及图像的具体特征有关。因为没有和具体

作者简介: 屈玉福(1976~),男,陕西靖边人,博士后,主要从事立体视觉检测技术和动态视觉检测技术方面的研究。

E-mail: quyufu@hit.edu.cn

收稿日期: 2004-03-15; 收到修改稿日期: 2004-11-03

调焦系统参量联系起来比较,所以这些比较研究对实践应用的指导意义有限。而在这些调焦评价函数的评价指标中,最重要的一个指标就是调焦函数的灵敏度,也就是调焦评价函数在焦点附近的斜率,这个指标直接决定着整个系统最终的调焦精度。因此,有必要研究自动调焦系统各个参量对调焦评价函数的灵敏度影响,以便在实际应用中有目的地选择和控制在调焦系统的各个参量进一步提高自动调焦的精度。

2 评价函数灵敏度影响因素理论分析

如图 1 所示,假设在坐标 (x_o, y_o) 处物体的光强

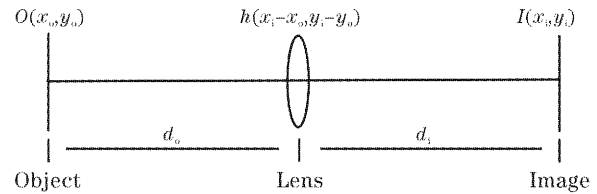


图 1 薄透镜成像原理图

Fig. 1 The image formation geometry of the thin lens 分布为 $O(x_o, y_o)$, 在透镜之后 d_i 的地方的光强分布为 $I(x_i, y_i)$, 假设光学系统为空不变系统, 依据波动传播的线性现象, 可以把光强分布 $I(x_i, y_i)$ 表示成如下的叠加积分^[15]:

$$I(x_i, y_i) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} h(x_i - x_o, y_i - y_o) O(x_o, y_o) dx_o dy_o. \quad (1)$$

由文献[15]知, 离焦时的光学传递函数:

$$h(f_x, f_y) = \Lambda\left(\frac{f_y}{2f_o}\right) \text{sinc}\left[\frac{8\omega\pi}{\lambda}\left(\frac{f_x}{2f_o}\right)\left(1 - \frac{|f_x|}{2f_o}\right)\right] \Lambda\left(\frac{f_x}{2f_o}\right) \text{sinc}\left[\frac{8\omega\pi}{\lambda}\left(\frac{f_y}{2f_o}\right)\left(1 - \frac{|f_y|}{2f_o}\right)\right], \quad (2)$$

其中 $f_o = l/(2\lambda d_i)$ 为光学系统的截止频率, $\Lambda(x)$ 是单位三角函数, f_x 和 f_y 为频域变量, ω 为离焦光程差:

$$\omega = \frac{l^2}{8} \left(\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} - \frac{1}{f} \right). \quad (3)$$

对(1)式做傅里叶变换, 将(2)式代入, 求傅里叶反变换即可得离焦后的像面上的照度公式为

$$I(x, y, \omega) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} h(f_x, f_y, \omega) O(f_x, f_y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y, \quad (4)$$

式中 $O(f_x, f_y)$ 为 $O(x_o, y_o)$ 的规范化频谱。

为了考查调焦函数的影响因素, 将图像的照度公式代入调焦评价函数中来推导调焦函数的灵敏度(即斜率)的数学模型。为使讨论具有代表性, 这里选用一个在以前的调焦函数性能评价实验^[12~14]中性能评价较好的梯度类函数——梯度平方函数作为例子。

梯度平方函数的表达式为^[13]

$$P(\omega) = \int_{-L_2-L_1}^{L_2} \int_{-L_1}^{L_1} \left\{ \left[\frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right\} dx dy, \quad (5)$$

其中 $I(x, y)$ 为像素 (x, y) 灰度值, L_1 和 L_2 分别为图像的长度和宽度。将(4)式代入(5)式化简得

$$P(\omega) = 32\pi^2 \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} (f_x f_{x1} + f_y f_{y1}) \times h(f_x, f_y, \omega) h^*(f_{x1}, f_{y1}, \omega) \times O(f_x, f_y) \times O^*(f_{x1}, f_{y1}) \times L_1 \text{sinc}[2\pi L_1(f_x - f_{x1})] \times L_2 \text{sinc}[2\pi L_2(f_y - f_{y1})] df_x df_{x1} df_y df_{y1}, \quad (6)$$

式中 $h^*(f_x, f_y, \omega)$ 和 $O^*(f_x, f_y)$ 分别为 $h(f_x, f_y, \omega)$ 和 $O(f_x, f_y)$ 的复共轭, f_{x1} 和 f_{y1} 为频域变量。(6)式即为调焦评价函数关于离焦光程差的函数表达式。

为了讨论的方便, 在这里假设被测物体只有简谐函数强度分布, 其强度的规范化频谱表达式如下:

$$O(f_x, f_y) = |O(f_1, f_2)| \exp[j\phi(f_1, f_2)] \cdot \delta(f_x - f_1) \delta(f_y - f_2), \quad (7)$$

则(6)式的积分值可化为

$$P(\omega) = 512\pi^2 L_1 L_2 |O(f_1, f_2)|^2 (f_1^2 + f_2^2) \times [1 - f_1/(2f_o)]^2 \times [1 - f_2/(2f_o)]^2 \times \left\{ \text{sinc}\left[\frac{8\omega\pi}{\lambda}\left(\frac{f_1}{2f_o}\right)\left(1 - \frac{f_1}{2f_o}\right)\right] \right\} \left\{ \text{sinc}\left[\frac{8\omega\pi}{\lambda}\left(\frac{f_2}{2f_o}\right)\left(1 - \frac{f_2}{2f_o}\right)\right] \right\}, \quad (8)$$

进一步假设该物体在 X 方向上的空间频率 $f_1 = F$ 为常数, Y 方向上的空间频率等于 $f_2 = 0$, 则(8)式可化

简为

$$P(w) = 512\pi^2 L_1 L_2 \times F^4 \times \left(1 - \frac{F}{2f_0}\right)^2 \times \left\{ \text{sinc}\left[\frac{8\omega\pi}{\lambda}\left(\frac{F}{2f_0}\right)\left(1 - \frac{F}{2f_0}\right)\right]\right\}^2, \quad (9)$$

将(9)式中调焦函数计算值对离焦误差求导,得调焦评价函数单调范围内的斜率与离焦量和图像空间频率的关系:

$$\frac{\partial P}{\partial w} = \frac{1028\pi^4 L_1 L_2}{f_0^6 \lambda^2} \times F^6 \times (2f_0 - F)^4 \times \left(4\text{sinc}\left[\frac{8\omega\pi}{\lambda}\left(\frac{F}{2f_0}\right)\left(1 - \frac{F}{2f_0}\right)\right] - \left\{ \text{sinc}\left[\frac{8\omega\pi}{\lambda}\left(\frac{F}{2f_0}\right)\left(1 - \frac{F}{2f_0}\right)\right]\right\}^2\right). \quad (10)$$

假设图像大小 L_1 和 L_2 都为 200 pixel,光学系统的空间截止频率 $f_0 = 100$ cycle/degree,照明光源的波长 $\lambda = 550$ nm,则调焦评价函数的计算数值如图 2 所示。

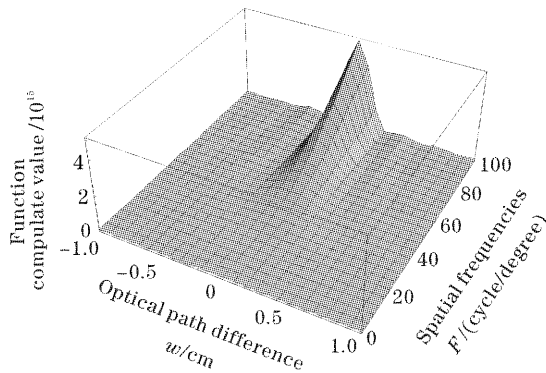


图 2 调焦评价函数与测试件空间频率关系图

Fig. 2 Relation plot of between focusing criteria function and workpiece spatial frequencies

因为只考虑焦点附近的斜率变化,换句话说,就是在焦点的可收敛范围内考察斜率,所以可不考虑 sinc 函数的影响,(10)式可进一步简化为

$$\frac{\partial P}{\partial w} = \frac{1028\pi^4 L_1 L_2}{f_0^6 \lambda^2} \times F^6 \times (2f_0 - F)^4, \quad (11)$$

从(11)式可以看出调焦评价函数的斜率与图像空间频率成高次正比关系(次数因调焦评价函数不同而异),将上式中的 F 设为变量,其余参量取与上面同样的数值,则可得斜率与图像空间频率的关系曲线如图 3 所示。

为便于观察,截取图 2 中空间频率为 50、80 和 100 的空间曲线,向平面投射得出图 4,从图 4 中显而易见调焦评价函数灵敏度与图像空间频率的关系。

从图 3 和图 4 可以清楚看到即使是同样一个函数,如果图像的空间频率不同,调焦评价函数的灵敏度也相差非常大。另外,由公式(8)可以看出,调焦评价函数的数学模型关于被测工件两个方向上的空间频率是完全对称的,因此假使点光源在 Y 方向上

的空间频率 $f_2 = F$ (为常数),X 方向上的空间频率等于 $f_1 = 0$ 以及两个方向上的空间频率分别为 $f_1 = F_1$ 和 $f_2 = F_2$ 都可得到与前面假设只有一个方向的空间频率为常数时同样的结论。

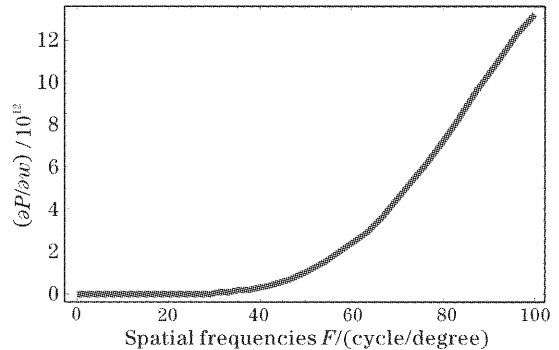


图 3 调焦评价函数灵敏度与测试件空间频率关系曲线

Fig. 3 Relation curve of workpiece spatial frequencies and focusing criteria function

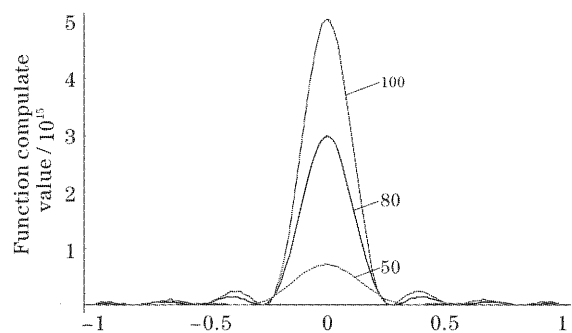


图 4 调焦函数与测试件空间频率的理论关系曲线

Fig. 4 Theoretical relation of focusing criteria function and workpiece spatial frequencies

另外,还可从(11)式看出调焦评价函数的灵敏度与调焦所选区域大小成线性关系。与照明光源的波长和光学系统空间截止频率成二次反比关系。

3 实验验证

为了验证以上理论分析的正确性,设计了以下

实验方案：在二维图像式测量机上，用调焦机构带动视觉测头上下移动，使得图像从模糊到清晰再到模糊，步进电机每走一步，即测头每相对于工件移动 $1\ \mu\text{m}$ ，采集一幅图像，用梯度平方函数对图像内所选择的区域进行一次计算，将所得的数据存入文件，用 MATLAB 对生成的数据文件进行分析和绘图。第一次实验使用三个空间频率显然不同的工件对梯度平方函数进行比较，图像大小为 $300\ \text{pixel} \times$

$300\ \text{pixel}$ ，工件如图 5 所示：(a) 刀口尺、(b) 方块印制板和 (c) 精细印制板。由此，可以得到梯度平方函数对不同空间频率的工件的调焦特性曲线。调焦实验曲线如图 6 所示。第二次实验分别选择图像的中心 $30\ \text{pixel} \times 30\ \text{pixel}$ 、 $64\ \text{pixel} \times 64\ \text{pixel}$ 、 $100\ \text{pixel} \times 100\ \text{pixel}$ 和 $200\ \text{pixel} \times 200\ \text{pixel}$ 大小的区域对图 5(c) 中所示图像进行调焦评价函数实验研究。调焦实验曲线如图 7 所示。

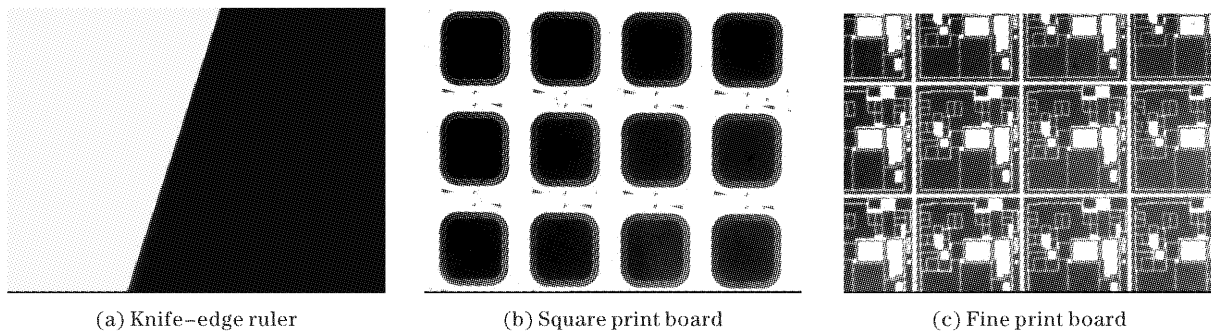


图 5 调焦实验的测试件图像

Fig. 5 The workpiece picture of focusing experiment

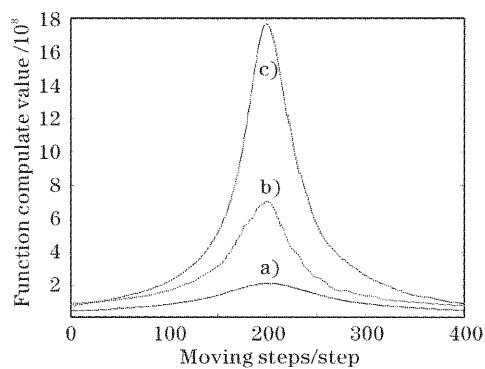


图 6 梯度平方函数与测试件空间频率的实验曲线

Fig. 6 Experimental curve of between gradient square function and workpiece spatial frequencies

从图 6、图 7 可以看出，实验调焦曲线与理论分析曲线完全吻合。对于同样一个调焦评价函数，它的灵敏度等特性随着调焦参量以及图像空间频率的不同而相差很大。对于梯度类调焦函数由于使用和梯度平方函数相同的评价原理，不同的只是求导次数和平方指数，使用上面相同的推理，完全可以得到与上面相同的结论，唯一不同的是调焦评价函数的斜率与图像空间频率的正比次数。

4 结 论

实验证明理论分析与实验结果完全一致。本研究将改变以往许多自动调焦系统设计者的认识误区，

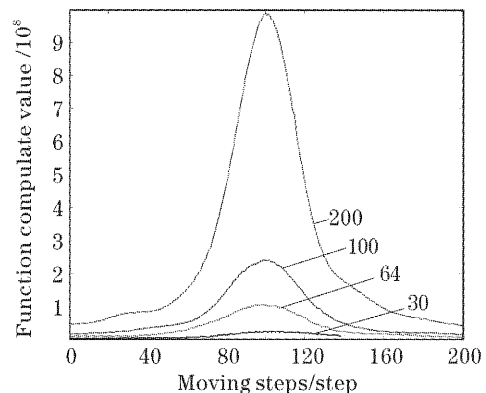


图 7 梯度平方函数与区域大小的实验曲线

Fig. 7 Experimental curve of between gradient square function and region size

调焦精度不仅和调焦评价函数有关，还和自动调焦时的被测件的空间频率、区域大小和光源波长等参量有关；并且调焦系统的精度并不是和被测件边缘对比度有关，而是和被测件的空间频率有关。从而在具体设计自动调焦系统时，有目的地使用投射结构光、增强或减弱照明光的亮度使得图像空间频率增大、在计算量允许的情况下增大调焦评价区域、改变照明光波长等手段进一步提高自动调焦的精度。

参 考 文 献

- 1 J. R. Fienup, Detecting moving targets in SAR imagery by focusing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3): 794~809

- 2 Zhishun She, D. A. Gray, R. E. Bogner. Autofocus for inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging[J]. *Signal Processing*, 2001, **81**(2): 275~291
- 3 Jian Li, Renbiao Wu, Victor C. Chen. Robust autofocus algorithm for ISAR imaging of moving targets [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, **37**(3): 1056~1069
- 4 Liu Zhangwen, Gu Tianxiang. Three-dimensional measurement of object by using gradient of CCD image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1384~1388 (in Chinese)
刘章文, 古天祥. 利用 CCD 图像的灰度梯度实现物体三维测量[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1384~1388
- 5 Christopher F. Batten. *Autofocusing and astigmatism correction in the scanning electron microscope* [D]. Dissertation for the Master Degree of University of Cambridge. 2000. 3~5
- 6 Wu Qinghua, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Influence of polarization of the incident light on image of the RSNO[M]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 513~516 (in Chinese)
武清华, 王桂英, 徐至展. 入射光的偏振特性对反射式近场光学显微镜成像结果的影响[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 513~516
- 7 Zeng Jiyong, Su Xianyu. Catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging for horizontal scene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 636~640 (in Chinese)
曾吉勇, 苏显渝. 水平场景无畸变的折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 636~640
- 8 Zhu Shiping, Qiang Xifu. Study on monocular vision method used to camera position[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 339~343 (in Chinese)
祝世平, 强锡富. 用于摄像机定位的单目视觉方法研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 339~343
- 9 T. T. E. Yeo, S. H. Ong, Jayasooriah *et al.*. Autofocusing for tissue microscopy[J]. *Image and Vision Computing*, 1993, **11**(10): 629~639
- 10 Yani Zhang, Ying Zhang, Changyun Wen. A new focus measure method using moments[J]. *Image and Vision Computing*, 2000, **18**(12): 959~965
- 11 Joewono Widjaja, Suganda Jutamulia. Wavelet transform-based autofocus camera systems[C]. *IEEE Conference*, 1998. 49~51
- 12 F. C. A. Groen, Ian T. Young, G. Lighthart. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms[J]. *Cytometry*, 1985, **6**(2): 81~91
- 13 H. Harms, H. M. Aus. Comparison of digital focus criteria for a TV microscope system[J]. *Cytometry*, 1984, **5**(3): 236~243
- 14 L. Firestone, K. Cook, K. Culp *et al.*. Comparison of autofocus methods for automated microscopy[J]. *Cytometry*, 1991, **12**(3): 195~206
- 15 J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics* [M]. Zhan Dasan, Dong Jingwu, Gu Benyuan transl., Beijing: Science Press, 1976. 88~170 (in Chinese)
J. W. 顾德门. 傅里叶光学导论[M]. 詹达三, 董经武, 顾本源译. 北京: 科学出版社, 1976. 88~170