

文章编号: 1000-7032(2014)12-1506-05

ICF 微靶装配体图像清晰度评价方法

聂 凯*, 刘文耀, 王晋疆

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 现有图像清晰度评价函数在对 ICF 微靶装配体图像的评价过程中, 由于不同零件图像对比度的变化, 评价函数极易失去其理想曲线特性, 导致聚焦精度降低甚至调焦过程失败。针对这一问题, 在分析离焦图像模糊原因的基础上, 得出离焦图像究其本质为图像结构变化失真。利用 Zernike 矩具有描述图像结构特征这一特性, 提出一种新的针对微靶装配体图像的清晰度评价函数。评价函数由图像不同阶 Zernike 矩的线性组合构成, 通过调节权重系数来实现微靶装配体不同零件图像的清晰度评价。实验结果表明: 相较于现有的评价函数, 新的评价函数在对微靶装配体图像评价过程中保持了函数的理想曲线特性, 尤其是针对低对比度图像, 其在灵敏度和抗噪性方面具有明显优势。

关键词: ICF 微靶装配体; 图像清晰度评价函数; 对比度; Zernike 矩

中图分类号: TP394

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20143512.1506

Image Definition Evaluation Method of ICF Micro-target Assembly

NIE Kai*, LIU Wen-yao, WANG Jin-jiang

(School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding Author, E-mail: niekai@me.com

Abstract: During the process of evaluating ICF micro-target image with the current image definition evaluation function, owing to the changes in image contrast of different components of micro-target, the evaluation function may lose its ideal curve characteristics easily. This may not only result in the decrease of focus accuracy but also, in some cases, the failure of the entire focusing process. Based on the analysis of the causes for the blurring defocused image, we discovered that the primary reason for defocused image was structural distortion. With the characteristic of Zernike moment of describing the image structure in mind, we propose a new function for evaluating the image definition of micro-target. The new evaluation function is consisted of Zernike moments weighting of different steps, and it is realized through the evaluation of image contrast for micro-targets of different definitions by regulating the weight coefficient. We confirm that the new evaluation function maintains the ideal curve characteristics during the process of evaluating the micro-target images compared to the current evaluation function. In the condition of low contrast, however, the new approach holds a distinct advantage in terms of sensitivity and noise immunity.

Key words: ICF micro-target; image definition evaluation function; contrast; Zernike moment

1 引 言

在激光核聚变 (Inertial confinement fusion, ICF) 的实验研究中, 作为关键部件的微靶, 其装配精度直接影响到“点火”实验的成功率^[1]。微靶装配体主要由金属靶腔及内部为氘、氚燃料填充的靶球构成^[2]。在利用显微视觉技术对微靶装配体的装配过程进行实时检测过程中, 自动调焦以获得清晰的微靶装配体聚焦图像是实现高精度自动化检测的首要环节。通过图像分析进行自动调焦的过程即利用清晰度评价函数对聚焦目标在不同成像位所成图像的清晰度评价过程, 评价函数的峰值对应的位置即被认定为聚焦位置^[3-4]。因此, 其技术核心为图像清晰度评价函数的选择。理想的清晰度评价函数需要具有无偏性、单峰性、灵敏度高特性以保证聚焦的精度^[5-7]。根据数学背景, 目前现有图像清晰度评价函数分为基于空间域的灰度梯度评价函数、基于频域的评价函数及基于信息学的评价函数。靶腔与靶球的材料差异决定了评价图像对比度的变化, 特别是靶球图像的对比度较低, 在这种情况下, 现有评价函数或出现局部极值、或灵敏度降低甚至失去曲线单峰性进而导致聚焦精度降低甚至聚焦失败。虽然可通过前期预处理如低通滤波、增强对比度等方式对低对比度靶球图像进行改善^[8-10], 但一方面增加了算法的复杂程度, 另一方面在处理过程中引入额外的噪声或导致图像原有高频信息的丢失。

本文在分析离焦图像本质为图像结构变化失真的基础上, 针对微靶装配体, 提出一种由不同阶 Zernike 矩的线性组合构成的图像清晰度评价函数, 并对各阶矩所对应的权重系数的取值进行了分析。最后通过实验验证了所提出评价函数的有效性。

2 离焦图像结构失真及图像 Zernike 矩

2.1 图像结构失真影像检测系统的硬件构成

光学成像系统中, 离焦图像灰度分布 $g(x, y)$ 可表示为聚焦图像灰度分布 $f(x, y)$ 与光学系统点扩散函数 $h(x, y)$ 的卷积:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y), \quad (1)$$

式中 (x, y) 为图像空间域的坐标。实际光学系统通常用二维高斯函数来近似点扩散函数:

$$h_{\text{Gauss}}(x, y) = \frac{1}{2\pi r^2} e^{-(x^2+y^2)/2r^2}, \quad (2)$$

式中 r 为点扩散函数分布的标准偏差的扩散参量, 与弥散圆半径 R 成正比: $r = cR$, 弥散圆大小与离焦量成正比。将 $h_{\text{Gauss}}(x, y)$ 进行傅里叶变换可得到光学系统的传递函数:

$$H(u, v) = e^{-\frac{1}{2}\rho^2(u, v)r^2}, \quad (3)$$

其中 $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$ 。

由以上可以看出, 透镜成像系统的点扩散函数等价于一低通滤波器, 滤波器的截止频率与离焦量成反比, 即随着离焦量的增大, 滤波器截止频率随之降低, 图像中的高频细节信息损失越多, 表现为图像模糊程度增加。

2.2 图像 Zernike 矩

图像的结构信息可以通过图像的矩来描述, 并且其细节的丰富程度可通过构造不同阶的矩来反映。由 2.1 节的分析可知, 离焦模糊图像究其本质为图像结构的变化失真, 因此可以通过矩对图像结构信息的描述来反映图像的模糊程度^[11]。在各种矩函数中, Zernike 矩作为一种连续正交矩, 其幅度为旋转不变量, 并且较其他矩函数具有良好的抗噪性和较好的信息冗余^[12]。图像 $f(x, y)$ 的 p 阶 q 重 Zernike 矩定义为:

$$Z_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 V_{pq}^*(r, \theta) f(r, \theta) r dr d\theta \quad (r \leq 1), \quad (4)$$

其中 $*$ 表示共轭。 $V_{pq}^*(r, \theta)$ 为定义在极坐标系下单位圆内的复域正交 Zernike 多项式:

$$V_{pq}(r, \theta) = R_{pq}(r) e^{iq\theta}, \quad (5)$$

式中 p, q 属于整数, 并且满足条件 $p > 0$ 。 R_{pq} 为实值多项式:

$$R_{pq}(r, \theta) = \sum_{s=0}^{(p-|q|)/2} (-1)^s \cdot \frac{(p-s)!}{s! \left(\frac{p+|q|}{2} - s\right)! \left(\frac{p-|q|}{2} - s\right)!} r^{p-2s}, \quad (6)$$

在笛卡尔形式中, Z_{pq} 可转化为:

$$Z_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \sum_{k=q}^p B_{pqk} \iint_{x, y} (x-iy)^{\frac{k+q}{2}} (x+iy)^{\frac{k-q}{2}} \cdot f(x, y) dx dy \quad (x^2 + y^2 \leq 1), \quad (7)$$

其中:

$$B_{pqk} = \frac{(-1)^{(p-k)/2} \left(\frac{p+k}{2}\right)!}{\left(\frac{p-k}{2}\right)! \left(\frac{k+q}{2}\right)! \left(\frac{k-q}{2}\right)!}, \quad (8)$$

相对于离散图像 $f(x, y)$ 的 p 阶 n 重 Zernike 矩可以表示为:

$$Z_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \sum_x \sum_y V_{pq}^*(x, y) f(x, y), \quad (9)$$

由上式可以看出,对于离散图像的 Zernike 矩,可以利用不同阶重的 Zernike 模板与对应图像的像素卷积得到。令 $f(x, y) = 1$, 模板为 M_{pq} , 则有:

$$M_{pq} = \iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{pq}^*(x, y) dx dy. \quad (10)$$

3 针对微靶装配体的图像清晰度评价函数

3.1 图像清晰度评价函数

由 Zernike 矩的笛卡尔形式可容易将其通过一系列由高阶至低阶的几何矩表示。将 Z_{11} 、 Z_{20} 、 Z_{31} 、 Z_{40} 经式(7)展开可得:

$$Z_{11} = (2/\pi)(m_{10} - im_{01}), \quad (11)$$

$$Z_{20} = (6/\pi)(m_{20} - im_{02}) - (3/\pi)m_{00}, \quad (12)$$

$$Z_{31} = (12/\pi)(m_{30} + m_{12}) - (12/\pi) \cdot i(m_{03} + m_{21}) - (8/\pi)(m_{10} + im_{01}), \quad (13)$$

$$Z_{40} = (30/\pi)(m_{40} + m_{04} + 2m_{22} - m_{20} - m_{02}) + (5/\pi)m_{00}, \quad (14)$$

其中

$$m_{pq} = \iint_{x^2+y^2 \leq 1} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (x^2 + y^2 \leq 1). \quad (15)$$

由展开式可以看出, Z_{11} 和 Z_{31} 主要描述图像的偏离程度,也就是图像相对中心点的对称度; Z_{20} 和 Z_{40} 主要描述图像关于中心点的亮度分布及分布曲线的平坦或尖锐程度。

利用文献[13]推导出的 Zernike 模板 M_{11} 、 M_{31} 、 M_{20} 、 M_{40} 与图像 $f(x, y)$ 做卷积,得到相对于 $f(x, y)$ 的各阶 Zernike 矩图像 $Z_{11}(x, y)$ 、 $Z_{20}(x, y)$ 、 $Z_{31}(x, y)$ 、 $Z_{40}(x, y)$, 定义 H_p 为:

$$H_p = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |Z_{pq}|, \quad (16)$$

其中 p, q 为整数, $p \in [1, 4]$, $q \in [0, 1]$ 且 $p - q$ 为偶数; M, N 分别为图像 $f(x, y)$ 的行数和列数。当 Z_{pq} 为实数矩时, $|\cdot|$ 表示实数矩绝对值; 当 Z_{pq} 为

复数矩时, $|\cdot|$ 为其幅值。针对微靶装配体的图像清晰度评价函数定义为:

$$E_{\text{moment}}(f) = \sum_{p=1}^4 W_p H_p, \quad (17)$$

式中 W_p 是权重系数。

3.2 权重系数 W_p 取值分析

由图像矩的属性可知,低阶矩主要用于描述图像总体水平的结构特征,而高阶矩则含有更丰富的图像细节,但同时噪声更加敏感。针对对比度较高的靶腔图像,高阶矩的权重系数可设定较大值,以此获得较高的评价函数对离焦量变化的敏感度。靶球图像由于对比度较低,评价过程受噪声的影响较大,因此低阶矩的权重系数应置较大值以增加评价函数的抗噪性,避免出现局部极值,保证评价曲线的平滑。由于评价图像为微靶装配体轮廓图像,因此利用图像最大灰度值与最小灰度值之差来衡量图像对比度的变化,定义评价图像对比度参考量 m 为:

$$m = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{L}, \quad (18)$$

其中 F_{\max} 、 F_{\min} 分别为图像的最大灰度值和最小灰度值, L 为图像的灰度级别。由 m 值的范围设定权重系数 W_p 的取值,如表 1 所示。

表 1 权重系数 W_p 取值设定

Table 1 Set of values of weight coefficient W_p

m	W_1	W_2	W_3	W_4
0.2~0.4	1	0.5	0	0
0.4~0.6	0.5	1	0.5	1
0.6~0.8	0	0.5	1	0.5
0.8~1.0	0	0	0.5	1

4 实验验证

4.1 实验系统

微靶装配显微视觉检测系统由 UNIQ VISION 公司生产的 UP-2000 黑白 CCD 相机、Edmund Optics 公司的 NT56-989 型 2 镜头日本 CCS(Creative customer satisfacti) 公司生产的 LFL-612-R 的 led 面阵光源配以精密定位平台构成,如图 1 所示。定位平台为 PI 公司 M-511. DD 型一维直线精密定位平台,平台配光栅尺进行反馈控制,分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$,重复定位精度小于 $1 \mu\text{m}$ 。显微成像系统固定于定位平台,通过驱动平台沿 Z 方向进行聚焦。



图 1 双目显微视觉检测系统

Fig. 1 Binocular microscopic visual detection system

4.2 算法验证实验及结果

设定定位平台的步距为 $50\ \mu\text{m}$, 针对靶腔及靶球在聚焦位附近分别取 30 个及 25 个成像位, 得到一系列靶腔及靶球图像, 如图 2 及图 3 所示。为验证本文所提出的算法的有效性, 利用 Entropy 熵函数、Brenner 函数、功率谱函数、Wavelet 小波函数^[14-18] 4 种常用评价函数及本文提出的评价函数对靶腔及靶球系列图像进行处理, 并将评价

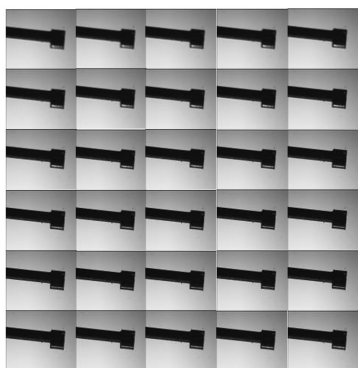


图 2 靶腔图像序列

Fig. 2 Array of the microcavity images

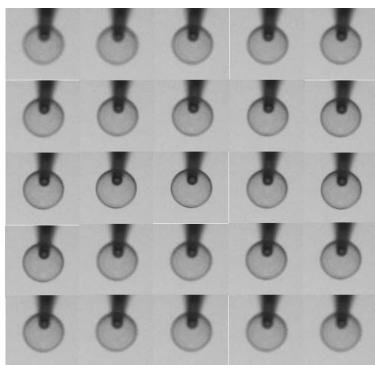


图 3 靶球图像序列

Fig. 3 Array of the microsphere images

函数值归一化, 绘制曲线如图 4、图 5 所示。

由图 4 可以看出, 针对高对比度的靶腔图像, 本文所提出的评价函数在峰值的尖锐性即对离焦量的敏感度方面明显优于 Entropy 函数和功率谱函数, 略逊于小波函数和 Brenner 函数。但针对后两者, 其在曲线的平滑性却占有一定的优势, 总体上具有良好的调焦性能。当评价对象为低对比度的靶球图像时, 本文所提出的评价函数较其他评价函数优势更为明显, 评价函数的峰值在比 Entropy 函数更加尖锐的同时, 其良好的抗噪性也从曲线的平滑程度上得到了体现, 同时峰值的无偏性也保证了聚焦的准确。

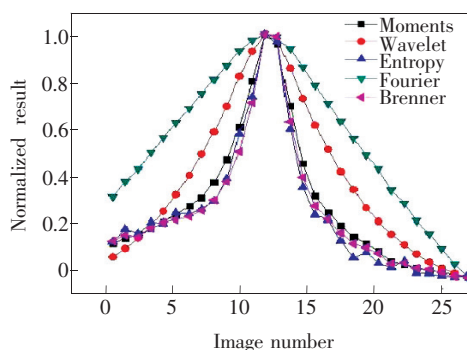


图 4 靶腔图像清晰度评价曲线

Fig. 4 Clarity evaluation curve of the microcavity image

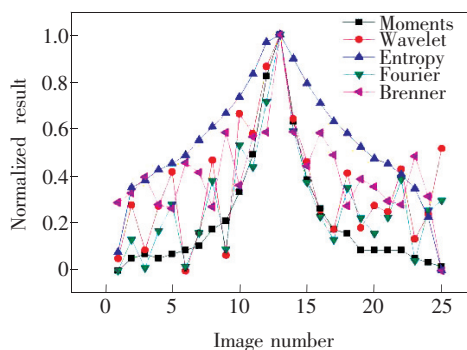


图 5 靶球图像清晰度评价曲线

Fig. 5 Clarity evaluation curve of the microsphere image

5 结 论

针对微靶装配体图像提出了一种新的清晰度评价函数, 函数由不同阶的 Zernike 矩的线性组合构成。通过调节不同阶矩所对应的权重系数可以实现对装配体不同零件图像的清晰度评价。在评价图像由于零件的不同所产生的对比度变化的情况下, 特别是针对低对比度的靶球图像, 克服了现有评价函数评价过程中失去评价曲线理想特性这

一问题。针对对比度较高的靶腔图像,函数与其他函数同样具有良好的调教性能,并且在曲线的平滑性和峰值的尖锐性上表现较为优秀;针对低

对比度的靶球图像,函数较其他函数的优势更加突出,在保证理想曲线特性的同时,在准确性、抗噪性及灵敏度方面也取得了满意结果。

参 考 文 献:

- [1] Wang T. Study on the Key Technologies of Online Monitoring System of Microtarget Assembly [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009 (in Chinese).
- [2] Wang T, Zhu Y, Yang K M. Structural design and finite element analysis of flexible clamping element [J]. *J. Beijing Univ. Technol.* (北京工业大学学报), 2012, 38(9):1293-1297 (in Chinese).
- [3] Sun Y, Duthaler S, Nelson B J. Autofocusing in computer microscopy: Selecting the optimal focus algorithm [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2004, 65(3):139-149.
- [4] Chen C Y, Hwang R C, Chen Y J. A passive auto-focus camera control system [J]. *Appl. Soft Comput.*, 2010, 10(1):296-303.
- [5] Pertuz S, Puig D, Garcia M A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus [J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(5):1415-1432.
- [6] Tsai D C, Chen H H. Reciprocal focus profile [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2012, 21(2):459-468.
- [7] Fan Y Y, Shen X H, Sang Y J. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2011, 19(10):2485-2493 (in Chinese).
- [8] Gamadia M, Kehtarnavaz N, Roberts-Hoffman K. Low-light auto-focus enhancement for digital and cell-phone camera image pipelines [J]. *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, 2007, 53(2):249-257.
- [9] Xu X, Wang Y, Zhang X, et al. A comparison of contrast measurements in passive autofocus systems for low contrast images [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2014, 69(1):139-156.
- [10] Xu X, Wang Y, Tang J, et al. Robust automatic focus algorithm for low contrast images using a new contrast measure [J]. *Sensors*, 2011, 11(9):8281-8294.
- [11] Wang Z, Bovik A C. Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(1):98-117.
- [12] Teague M R. Image analysis via the general theory of moments [J]. *JOSA*, 1980, 70(8):920-930.
- [13] Gao S Y, Zhang M Y, Zhang L, et al. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on Zernike orthogonal moments [J]. *Acta Automatica Sinica* (自动化学报), 2008, 34(9):1163-1168 (in Chinese).
- [14] Yousefi S, Rahman M, Kehtarnavaz N. A new auto-focus sharpness function for digital and smart-phone cameras [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, 57(3):1003-1009.
- [15] Hassen R, Wang Z, Salama M M A. Image sharpness assessment based on local phase coherence [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(7):2798-2810.
- [16] Brenner J F, Dew B S, Horton J B, et al. An automated microscope for cytologic research a preliminary evaluation [J]. *J. Histochem. Cytochem.*, 1976, 24(1):100-111.
- [17] Zhang Y C, Sun Q, Zhao J, et al. Application of depth from defocusing based on logarithmic power spectrum to multi-spectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2013, 21(3):767-773 (in Chinese).
- [18] Minhas R, Adeel M A, Wu Q M J. Shape from focus using fast discrete curvelet transform [J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(4):839-853.



聂凯(1982-),男,黑龙江鹤岗人,博士研究生,2008年于河北工业大学获得硕士学位,主要从事数字图像处理方面的研究。

E-mail: niekai@me.com