

doi:10.3788/gzxb20124102.0222

不同对比度下自适应的自动调焦新算法

韩瑞雨,王晋疆,聂凯,刘阳

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室,天津 300072)

摘 要:针对大多数自动调焦函数不能克服对比度变化引起的调焦曲线失去理想特性、陷入局部极小值甚至失去单峰性等问题,介绍了 Zernike 正交矩,分析了各阶 Zernike 矩的调焦函数曲线并且提出了一种新的基于 Zernike 正交矩的自动调焦算法,定义了此算法的公式,与几种常用自动调焦函数在不同对比度条件下进行了调焦效果的比较分析,验证了通过调整各阶 Zernike 矩的权重系数、可以灵活变换调焦公式,能够适应不同对比度下的调焦过程.实验比较了基于 Zernike 正交矩的自动调焦算法应用于完全对称型物体和非对称型物体时调焦效果的差别,证明了该算法应用于圆形或球状等完全对称型的物体时调焦效果较好.

关键词:自动调焦;调焦函数;对比度;Zernike 正交矩

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)02-0222-6

短,适合于实时调焦.

0 引言

在基于图像测量的自动调焦过程中,调焦函数是其中的核心部分.自动调焦函数提取图像中的特征值或者高频分量,特征值或者高频分量多的图像对应的被测物处于对焦状态,特征值或者高频分量少的图像对应的被测物则处于离焦状态.理想的调焦函数需要具有无偏性、单峰性、灵敏度高、计算量小等特性^[1].目前已有的自动调焦函数主要可分为四类:基于空域的评价函数,基于频域的评价函数,基于信息学的评价函数和基于小波的评价函数.在对比度高、信噪比好的调焦环境下,上述评价函数都符合理想的特性;但是在工业上微小透明零件测量和医学上微生物测量的低对比度环境下,大多数评价函数会失去原来的理想特性,陷入局部极小值甚至失去原来的单峰曲线.虽然可以通过提高对比度、低通滤波等方式减弱对比度过低给调焦带来的不利影响^[2],但过程相对繁琐复杂,图像方法拉伸对比度也会增加额外的噪音,低通滤波器的选择不当也会造成滤波不足使得噪音依然存在或者滤波过度使得图像原本高频信息被消除的问题.

针对大多数自动调焦函数不能克服对比度变化带来的不利影响的问题,本文提出了一种基于 Zernike 正交矩的调焦算法,通过适当调整图像的 Zernike 各阶矩的权重系数,使调焦曲线在不同的对比度条件下都能够保持良好的调焦特性,并且用时

1 Zernike 正交矩

一个从一幅数字图像中计算出的矩函数通常描述了该图像形状的全局特征,并且包含了大量该图像的几何特性信息.目前矩函数已经广泛用于模式识别、图像检索、边缘检测等计算机视觉领域.

Zernike 正交矩是基于 Zernike 多项式的正交化函数.由于正交函数表示图像的非相关性,所以它具有最小的信息冗余度^[3].Zernike 矩是由 Teague^[4]从图像重建的角度出发引入的,Ghosal 和 Mehrotra 则提出利用 Zernike 正交矩来检测亚像素边缘^[5],Zernike 正交矩在特征表达能力和低的噪音敏感度方面具有较大的优越性.并且由于 Zernike 矩是一组正交矩,具有旋转不变性,所以对于完全对称的图像(如圆形、球形等)特征的描述,Zernike 矩具有天然的优势.

图像 f 的 n 阶 m 次 Zernike 矩定义为

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

式中 $*$ 表示复共轭, n 和 m 满足条件: $n=0, 1, 2, \dots, \infty, 0 \leq |m| \leq n, n-|m|$ 为偶数, $V_{nm}(r, \theta)$ 是在极坐标系中单位圆内的正交的 n 阶 m 重的 Zernike 多项式,定义为

$$V_{nm}(r, \theta) = R_{nm}(r) e^{im\theta} \quad (2)$$

式中 R_{nm} 为实数径向多项式

第一作者:韩瑞雨(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向为图像处理. Email:hanruiyu1986@yahoo.com.cn

导 师:王晋疆(1974—),男,副教授,主要研究方向为光电检测技术、光电成像技术. Email:wjj@tju.edu.cn

收稿日期:2011-09-26;修回日期:2011-11-15

$$R_{mm}(r, \theta) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \cdot \frac{(n-s)!}{s! ((n-2s+|m|)/2)!} \gamma \quad (3)$$

在离散情况下, Zernike 矩的计算通常是 Zernike 模板与图像进行卷积得到, 用单位圆进行采样, 令图像 $f(x, y) = 1$, 模板 M_{mm} 有

$$M_{mm} = \iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{mm}^*(r, \theta) dx dy \quad (4)$$

本文利用文献[6]推导出 7×7 的 Zernike 模板 M_{11} 、 M_{20} 、 M_{31} 、 M_{40} , 就可以计算出图像相对应的各阶 Zernike 矩。

2 基于 Zernike 正交矩的调焦算法

本文的调焦对象是球状的微小透明零件, 其与 LED 面阵光源的工作距离在 $2 \sim 3$ mm, 但是当被测对象距离光源距离这么近时, 被测透明零件的边缘与背景的灰度值已经相当接近, 对比度达到相当低的状态. 为了方便比较, 本文采集了两组透明小球零件的图像, 每组 29 帧, 一组小球距离光源 5 cm, 此时图像对比度较高, 如图 1 所示. 另一组距离光源 2 mm, 图像对比度较低, 如图 2.

根据矩函数可以描述图像特征的原理, 对图 1 的调焦测试图像序列计算各阶 Zernike 矩 Z_{11} 、 Z_{20} 、

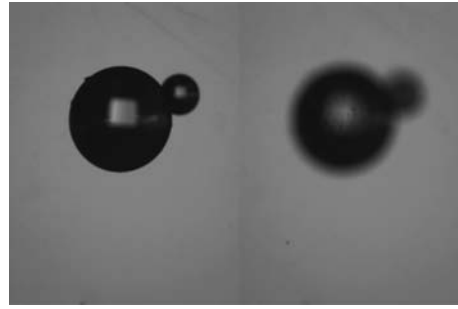


图 1 高对比度下对焦和离焦图像

Fig. 1 The in and out of focus ball's image in high contrast

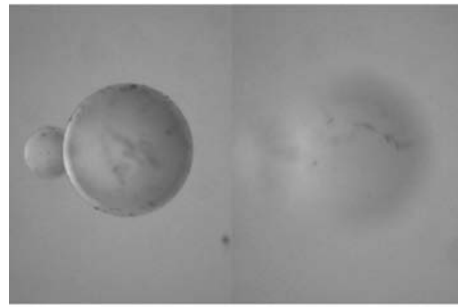


图 2 低对比度下对焦和离焦图像

Fig. 2 The in and out of focus ball's image in low contrast

Z_{31} 、 Z_{40} , 描绘成曲线如图 3, 发现各阶矩函数的曲线都符合调焦曲线单峰性、无偏性等特点, 这说明 Zernike 正交矩的各阶函数在高对比度条件下可以作为调焦函数评价图像的清晰程度。

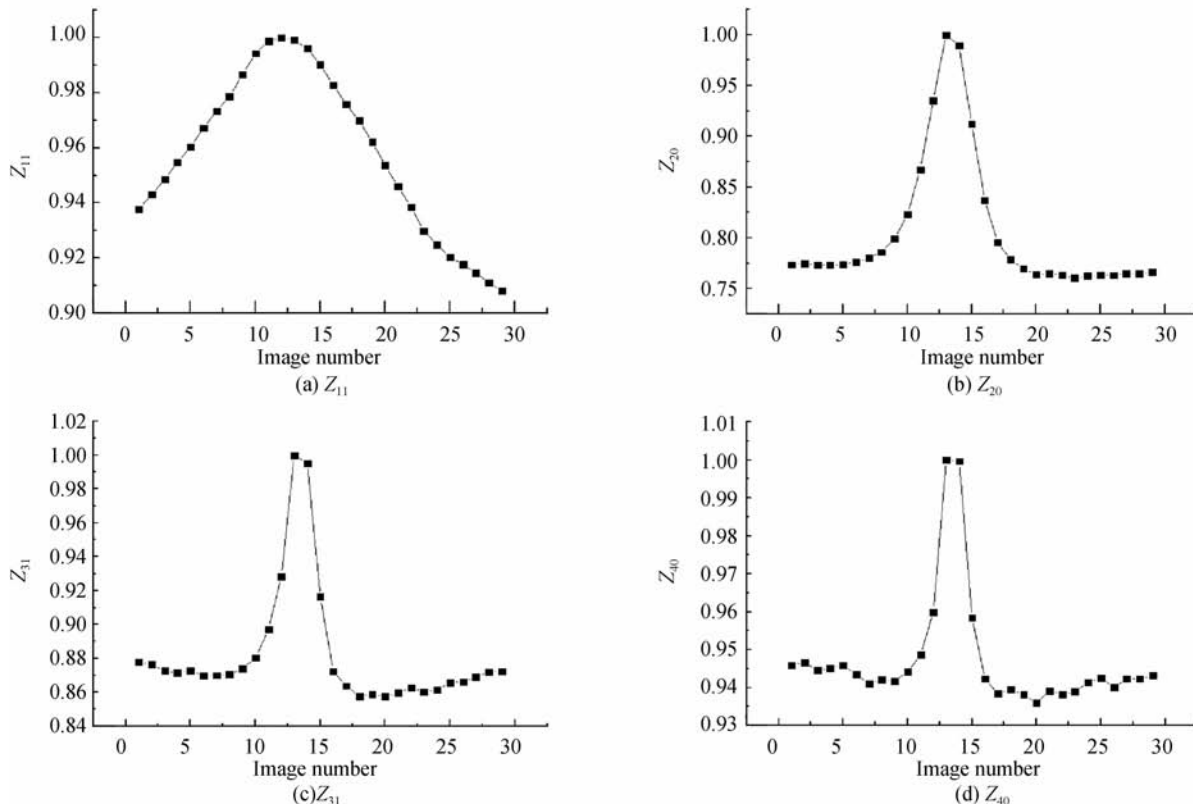


图 3 高对比度下各阶 Zernike 矩的调焦曲线

Fig. 3 The focus curve of every order Zernike orthogonal moments in high contrast

图 4 是对图 2 的低对比度小球图像序列求取 Zernike 矩的调焦曲线,虽然从图中可看出对比度降低,调焦曲线受噪音的影响也会更大,但是结果显示

Zernike 各阶矩函数在低对比度条件下较其它调焦函数仍然有更优良的表现。

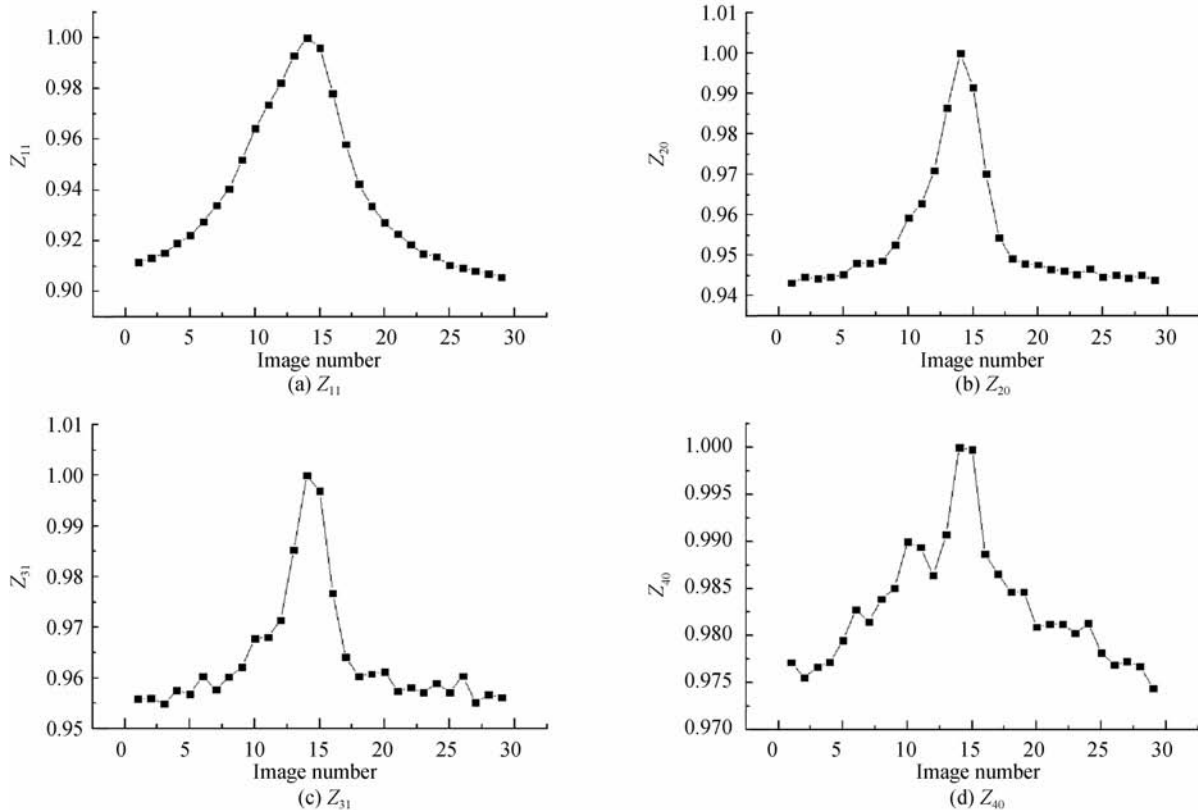


图 4 低对比度下各阶 Zernike 矩调焦曲线

Fig. 4 The focus curve of every order Zernike orthogonal moments in low contrast

从图 4 可以看出,阶数越高,用 Zernike 矩计算出的调焦曲线接近对焦位置时越陡峭,越尖锐,但是模糊调焦阶段出现局部极大值的几率也越高,从图 3 和图 4 可以看出这一现象.这是因为低阶矩用于描述图像的总体特征,而高阶矩则包含了更好的图像细节,但同时噪音更加敏感,因此需要通过组合变换的方式消除或减少噪音影响。

为此,定义基于 Zernike 矩的调焦函数为

$$F(n) = \sum_{k=1}^4 W_k Z_k(n) \quad (5)$$

式中 Z_k 为图像的 1~4 阶 Zernike 矩, W_k 是权重系数,根据对比度的不同可以调整不同的权重系数,当对比度较高时将高阶矩的权重系数置大,对比度较低时则将高阶矩权重系数置小,避免或减少因对比度降低造成的噪音影响,以达到良好的调焦效果。

本文通过对高低对比度情况下两组调焦测试图像的各阶 Zernike 正交矩分析知道,高对比度情况下较高阶 Zernike 正交矩 Z_{20} 、 Z_{31} 构成的调焦曲线半宽度小、峰值尖锐,并且受噪音影响也小,没有局部极大值的出现,可以将其权重系数设置较大值,低阶矩 Z_{11} 的调焦曲线虽然平滑,但是在峰值处也较为平缓,最清晰位置的图像与附近的图像并不能明

确区别,可以将它的权重系数设置为较小值,高阶矩 Z_{40} 虽然峰值突出,但是模糊对焦阶段已经开始受噪音影响,出现了局部极值,在此可以将其权重系数设的更小甚至为零;低对比度下小球更加透明了,灰度值与周围环境差别变小,在这种情况下从图 4 的分析可知,低阶矩 Z_{11} 峰值处已经变得比高对比度下更为尖锐,并且依然保持良好的曲线平滑性,可将其的权重系数增大, Z_{20} 也仍然保持着良好的调焦曲线特性,而随着阶数变大,高阶矩 Z_{31} 、 Z_{40} 受噪音的影响已经越来越大,从图 4 中已经可以看出,虽然保持着单峰性,局部极大值却越来越明显,因此可以将高阶矩的权重系数设置较低甚至为零,依靠低阶矩良好的调焦性能,将低阶矩作为基于 Zernike 正交矩调焦评价函数的主要因素。

3 实验验证

3.1 实验系统

本文的自动对焦平台由 UP-800 CCD 摄像机 (1 024×776 pix)、Meteor II Digital 图像采集卡、日本 CCS 公司生产的 LFL-612-R 的面阵光源、和 Navitar 1-62315 电动变焦镜头以及计算机图像处

理系统组成,其系统原理如图 5.

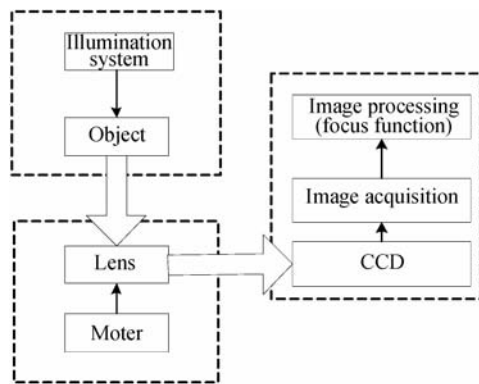


图 5 实验系统原理图

Fig. 5 The schematic of experimental system

3.2 实验结果

为了验证本文算法的有效性,分别对上述对称的球形待测物体和非对称的直线型待测物体有机玻璃边缘进行实验比较。

1) 球形物体

本文使用基于 Zernike 正交矩的调焦函数对测试图像序列图 1 和图 2 做了测试,实验中对图 1 的高对比度图像权重系数取 $W_1 = 0.5$ 、 $W_2 = 1$ 、 $W_3 = 0.5$ 、 $W_4 = 0$,对图 2 的低对比度图像取 $W_1 = 0.5$ 、 $W_2 = 1$ 、 $W_3 = 0$ 、 $W_4 = 0$ 。

因此,在高对比度条件下使用的 Zernike 正交矩调焦评价函数为

$$F(n) = 0.5 * Z_{11} + Z_{20} + 0.5 * Z_{31} \quad (6)$$

低对比度条件下使用的 Zernike 正交矩调焦评价函数为

$$F(n) = Z_{11} + Z_{20} \quad (7)$$

并与其它四种常用调焦函数(见附录)曲线进行比较,结果如图 6。

从两幅归一化的调焦函数曲线图分析可知,相对于高对比度条件下各个常用调焦函数的理想特性曲线,在低对比度情况下,除了信息熵函数保持了调焦曲线良好的光滑特性与单峰性,其它调焦函数受噪音影响较大,存在多个局部极小值;Brenner 函数还能保持单峰特性和大体的调焦曲线走向,小波函数已经失去了原有的单峰性,基于功率谱的调焦函数已经不能反映出图像的清晰位置了。

使用基于 Zernike 正交矩的调焦函数分别对两组调焦测试图像求取函数值,构成调焦曲线,并且与其它四种常用调焦评价函数进行归一化比较,结果如图 6(a)和图 6(b)所示。从图中的比较结果中可以看出,高对比度条件下 Zernike 正交矩函数和小波函数、Brenner 函数一样,曲线平滑、峰值尖锐,调焦特性良好;而在低对比度条件下 Zernike 正交矩函数的优势就愈发突出了,在模糊调焦阶段,Zernike

正交矩函数明显比其它函数下降更快,精确调焦的部分,Zernike 正交矩函数的峰值也比熵函数更加尖锐,并且曲线平滑,没有受到噪音影响出现局部极大值或者峰值偏移的情况。可见,对圆形或者球状物体调焦过程中,基于 Zernike 正交矩的自动调焦评价函数是具有较强适应性图像清晰度的评价判据,可以满足不同对比度条件下基于图像的自动调焦过程。

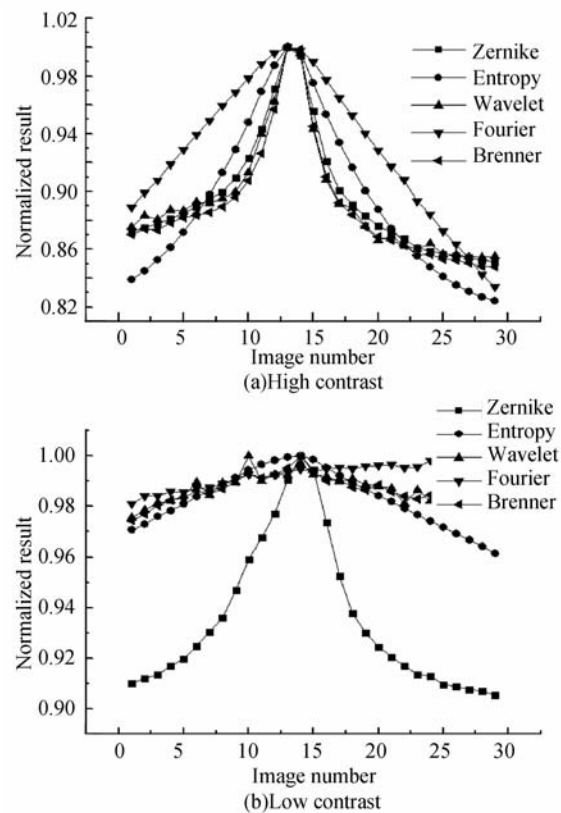


图 6 小球物体 Zernike 矩与其它调焦函数比较

Fig. 6 Ball's comparison of Zernike and other focus function

2) 直线型物体

如图 6,调焦的对象为有机玻璃的直线边缘。依据小球图像的方法,图 7 的高对比度图像权重系数取 $W_1 = 0.5$ 、 $W_2 = 1$ 、 $W_3 = 0.5$ 、 $W_4 = 0$,图 8 的低对比度图像取 $W_1 = 0.5$ 、 $W_2 = 1$ 、 $W_3 = 0$ 、 $W_4 = 0$ 。得到的调焦评价函数分别如式(6)和式(7)所示。

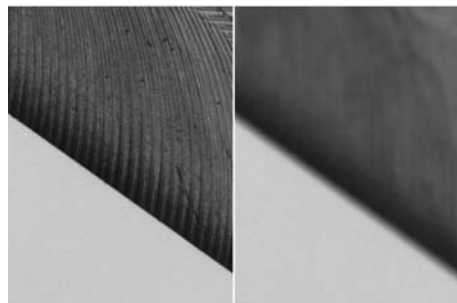


图 7 高对比度下有机玻璃对焦和离焦图像

Fig. 7 The in and out of focus glass's image in high contrast

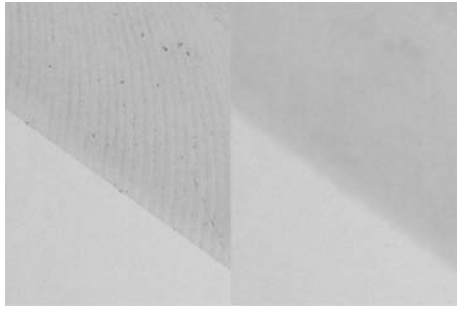


图 8 低对比度下有机玻璃对焦和离焦图像
Fig. 8 The in and out of focus glass's image in high contrast

用这两个调焦函数对图 7 和图 8 的两个图像序列计算函数值并描绘出调焦函数曲线,并与其它四种函数曲线进行比较,如图 9.

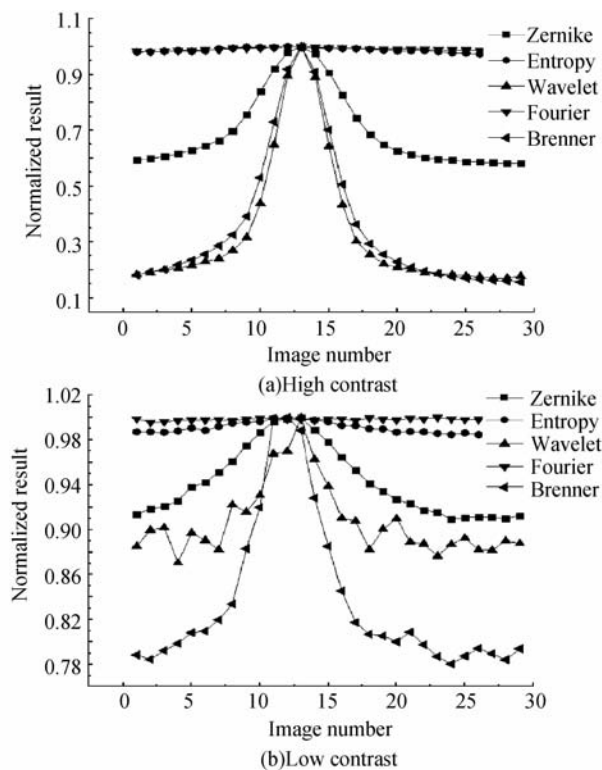


图 9 直线型物体 Zernike 矩与其它调焦函数比较
Fig. 9 Glass's comparison of Zernike and other focus function

图 9 中高对比度下基于 Zernike 正交矩的调焦函数曲线平滑、无局部极小值,虽然顶端没有 Brenner 函数、小波函数尖锐,但仍然具有理想调焦函数的特性;低对比度下所有调焦函数基本上都出现了局部极值,基于 Zernike 正交矩的调焦函数即使权重系数偏向于低阶矩,也不能避免噪音的影响,在第 24 帧图像的前后仍然出现了局部极小值,并且其调焦曲线顶部趋于圆滑,聚焦点附近几帧的图像清晰度已接近无法分辨,所以即使增大低阶矩权重或者减小高阶矩权重只会增大圆滑程度.但是基于 Zernike 正交矩的调焦函数与其它调焦函数曲线相比已经有了很大程度的改善,局部极值只是出现在模糊调焦阶段,可以通过阈值排除掉陷入局部极值

的危险性,它可以用于粗调阶段,在聚焦点附近可以与单峰更为尖锐的调焦函数(例如 Brenner 函数)结合使用.

4 结论

基于 Zernike 正交矩的调焦函数是一种具有良好的适应性的调焦函数,可以通过调整各阶 Zernike 正交矩的权重系数,作用于不同对比度环境的自动调焦过程中;高对比度时该函数与其它调焦函数一样保持着良好的调焦特性,低对比度时显现了比其它调焦函数更优良的特性;特别是对于圆形或者球状这种完全对称型的物体,它具有天然的优势,而对于非对称型的物体,它仍然具有一定的优越性.

附录

本文列举了各类中具有代表性的调焦函数,进行不同对比度条件下的分析.

1) 空域: Brenner 函数^[7]

此函数对相邻像元进行平方求和,其公式为:

$$F(n) = \sum_i \sum_j [I(i+k, j) - I(i, j)]^2$$

2) 频域: 基于功率谱的调焦函数^[8]

此函数将功率谱定义为自动调焦函数值:

$$F(n) = \sum_u \sum_v P(u, v) = \sum_u \sum_v [R^2(u, v) + I^2(u, v)]$$

其中 $R(u, v)$ 和 $I(u, v)$ 分别是对图像做傅里叶变换后的实部和虚部,最大的函数值 $F(n)$ 所对应的第 n 帧图像既是对焦最清晰的位置.

3) 信息熵: 基于熵判据的调焦函数^[9]

$$F(n) = - \sum_{k=0}^G P(k) \log P(k)$$

式中 G 是一幅图像的灰度等级数, $P(k)$ 是每个灰度级的概率.

4) 小波域: 基于小波变换后高频子带能量的调焦函数^[10]

用 Daubechies 小波 db1 对图像进行二维小波变换后,图像将分为平均部分和水平、垂直、对角的三个高频子带部分,本文提取后三部分的高频分量作为判断图像是否清晰的标准

$$F(n) = \sum_u \sum_v [C_{HL}^2(u, v) + C_{LH}^2(u, v) + C_{HH}^2(u, v)]$$

参考文献

- [1] 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): 532-533.
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): 532-533.
- [2] GAMADIA M, KEHTARNAVAZ N, ROBERTS-HOFFMAN K. Low-light auto-ofcus enhancement for digital and cell-phone camera image pipelines[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, **53**(2): 249-257.
- [3] 王耀明. 图像的矩函数: 原理、算法及应用[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2002.

- [4] TEAGUE M R. Image analysis via the general theory of moments[J]. *JOSA*, 1980, **70**(8):920-930.
- [5] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. *Pattern Recognition*, 1993, **26**(2):295-306.
- [6] GAO Shi-Yi, ZHAO Ming-Yang, ZHANG Lei, et al. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on zernike orthogonal moments [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(9):1163-1168.
高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进[J]. *自动化学报*, 2008, **34**(9):1163-1168.
- [7] 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.
- [8] 蒋婷. 基于图像处理的自动对焦理论和技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [9] KANG Zong-ming, ZHANG Li, XIE Pan. Implementation of an automatic focusing algorithm based on spatial high frequency energy and entropy[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, **31**(4): 553-555.
康宗明, 张利, 谢攀. 一种基于能量和熵的自动聚焦算法[J]. *电子学报*, 2003, **31**(4):553-555.
- [10] CHEN Xiao-bin. Study on auto-focus algorithm based on wavelet transform[J]. *Communications Technology*, 2010, **43**(6):210-212.
陈晓彬. 基于小波的自动对焦算法研究[J]. *通信技术*, 2010, **43**(6):210-212.

Adaptive Autofocus Technique Under Different Contrast

HAN Rui-yu, WANG Jin-jiang, NIE Kai, LIU Yang

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology (Ministry of Education),
School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For most of the auto-focus function's problems of focus curve losing desirable characteristics, falling into local minimum value and even losing single peaks, which are caused by changes in contrast, Zernike orthogonal moments was introduced and the focus curves were analyzed. A new auto-focusing algorithm was presented which based on Zernike orthogonal moments and the algorithm's formula was defined. Compared with the focusing effect of several common auto-focus functions under different contrast, the algorithm can adapt to different contrast under the focusing process by adjusting the weighting coefficients to change the formula. The experiment compared the algorithm focus curves' difference between completely symmetric objects and non-symmetric objects, proved that the algorithm is more effective for the completely symmetric objects such as the round or spherical objects.

Key words: Autofocus; Auto-focus function; Contrast; Zernike orthogonal moments