

文章编号:1000-582X(2011)11-025-06

多窗口模式 Roberts 聚焦评价方法及其应用

尹爱军^{a,b}, 张焱^{a,b}, 杨彬^{a,b}, 秦晓猛^{a,b}

(重庆大学 a. 机械传动国家重点实验室; b. 机械学院, 重庆 400030)

摘要:自动对焦是图像测量和机器视觉中的重要技术。分析了自动对焦的基本原理,研究了自动对焦过程中的核心问题,提出了一种基于多区域聚焦窗口模式的改进 Roberts 聚焦评价函数的自动对焦方法。对图像进行滤波去噪预处理,选取多区域聚焦窗口,利用改进的 Roberts 聚焦评价函数进行评价,最后采用全局搜索和二分查找相结合的方法进行快速焦点定位。试验结果表明该方法兼顾了灵敏性、稳定性,可快速实现自动对焦。

关键词:对焦;评价函数;多窗口;焦点搜索

中图分类号:TP317.4

文献标志码:A

Roberts focused evaluation method and its application in multi-windows mode

YIN Ai-jun^{a,b}, ZHANG Yan^{a,b}, YANG Bin^{a,b}, QIN Xiao-meng^{a,b}

(a. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission;

b. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Automatic focusing is an important technology for image measurement and machine vision. The basic principle of automatic focusing is analyzed and the key problems of automatic focusing are researched, then a new kind of method based on multiple focusing windows and improved Roberts focused evaluation function is proposed for automatic focusing. First, the image is pre-processed by filtering and denoising. Second, image is evaluated with improved roberts focused evaluation function in many focusing windows. Third, focus of images is quickly located based on global search and binary sorting. Experiments show the method can perform fast autofocus process with sensitivity and stability.

Key words: focusing; function evaluation; multi-window; focus searching

自动对焦是图像测量和机器视觉中的关键问题之一。基于数字图像处理的自动对焦技术作为数字图像处理的一个分支,受到越来越多的关注。自动对焦系统中的核心问题是聚焦评价函数和焦点搜索方法,而聚焦评价函数的准确性和有效性直接决定了聚焦效果的好坏^[1]。现有的图像清晰度评价方法大致可分为两类:空域度量方法和频域度量方法。空域度量法可根据图像的边缘信息和梯度幅值来判断图像的清晰度,例如基于灰度梯度方法^[2]和统计

学方法^[3]等,具体的有基于 Roberts 算子、Sobel 算子和 Vollath's^[4]等方法,其中 Roberts 算子稳定性好且计算速度快,但其灵敏度一般;Sobel 算子在近焦区灵敏度高,远焦区的有效范围广,但抗干扰性差,易受噪声影响;Vollath's 的精度和计算速度居中。频域度量法根据图像中的高频分量来判定图像的清晰度,例如快速傅里叶变换法、小波包变换法^[5]和离散小波变换法^[6]等。快速傅里叶变换法灵敏度和单值性较好,但运算时间长,实时性差;小波变换

收稿日期:2011-06-20

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR10110021)

作者简介:尹爱军(1978-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事智能测试与虚拟仪器,现代信号分析与处理,机器视觉等领域的研究。(E-mail)yinaijun2001@yahoo.com.cn。

聚焦评价法的相关理论目前还不成熟。

笔者在分析比较了常用对焦方法的基础上,提出了基于多区域聚焦窗口模式的改进 Roberts 聚焦评价函数的自动对焦方法。该方法首先对全局图像进行中值滤波提高聚焦图像清晰度;再在多窗口模式下利用改进的 Roberts 聚焦评价函数计算聚焦评价价值;最后采用全局搜索与二分查找相结合的方法进行焦点快速定位。该算法减少了自动对焦所需采集的图像数量,在对焦速度、精度、灵敏度以及稳定性方面均有明显的提高。

1 自动对焦基本原理

1.1 光学原理

任何光学成像系统都可以等效为一个理想高斯成像系统^[1],如图 1 所示,并有如式(1)的成像公式。

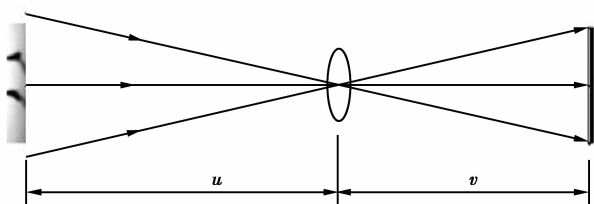


图 1 光学成像光路示意图

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (1)$$

由公式(1)可知,光学成像系统的三要素焦距 f 、物距 u 和像距 v 能否形成物像共轭关系将影响图像的清晰度。该共轭关系满足得越好,则聚焦程度越高,图像越清晰;反之,图像越模糊。因此,通过判断是否满足物像共轭关系的方法作为调焦判据的理论依据。

1.2 自动对焦分类及原理

自动对焦方法大致可总结为两类:一类为测距法,该方法不断测量镜头与被拍摄目标之间的距离来完成自动对焦;另一类为聚焦检测法,该方法在成像面上接收目标物体的模拟影像,在正确聚焦时检测值最大。

测距法自动对焦是通过测量物体与镜头的距离来计算对焦位置的。通过改变像距、物距和焦距中的一个或多个要素以满足物像共轭关系,从而实现对焦过程。测距法自动聚焦操作较为简单,但具体实现机构比较复杂,在一些特殊的场合不适用,比如物体与镜头之间有障碍物存在时会导致距离测定失误以及对显微图像分析效果不理想。

聚焦检测自动对焦法首先对图像进行分析计

算,然后根据分析结果驱动电机来调节镜头使之准确对焦。该方法的核心是图像清晰度的评价及聚焦点的快速定位。

2 自动对焦中的关键问题

2.1 图像清晰度评价函数

准确有效的图像清晰度评价函数是采用数字图像处理技术实现自动调焦的关键。图像的清晰度反映了系统的离焦/聚焦程度。当图像清晰,即对焦准确时,图像细节清晰,在空域中表现为相邻像素的特征值(如灰度、颜色等)变化较大,在频域中表现为频谱的高频分量丰富。因此对焦评价函数的好坏与调焦精度和速度有着直接关系。

对焦评价函数应具有以下基本性质:1)单峰性,且对同一成像目标的系列图像中,最大评价价值恰好对应最清晰的图像;2)单调性,函数在峰值两侧一定区间内应明显分别单调上升和单调下降;3)函数在峰值两侧的斜率绝对值较大;4)计算量小,对于提高系统的实时性,计算量越小越好。

常用的评价函数包括灰度向量方差函数、拉普拉斯梯度函数、Roberts 梯度函数、图像信息熵函数、基于傅里叶变换或小波变换的频域评价函数等^[1]。图像灰度向量方差函数计算时间短,效率高,Roberts 梯度算法和梯度向量模方算法函数的稳定性较好^[7];小波带通滤波器与边缘特征图像能量相结合的对焦评价函数,在单值性和灵敏度方面好于方差函数^[8]。

设大小为 $M \times N$ 的图像中点 (x, y) 处的灰度值为 $g(x, y)$,则灰度向量方差函数为

$$\begin{cases} \bar{G} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N g(x, y), \\ F = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |g(x, y) - \bar{G}|^2. \end{cases} \quad (2)$$

Roberts 梯度函数为

$$F = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \{ |g(x, y) - g(x+1, y+1)| + |g(x+1, y) - g(x, y+1)| \}. \quad (3)$$

基于小波变换的频域评价函数为

$$F = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \left\{ -\frac{1}{16}g(x-1, y-1) - \frac{1}{168}g(x-1, y) - \frac{1}{16}g(x-1, y+1) - \frac{1}{8}g(x, y-1) + \frac{3}{4}g(x, y) - \frac{1}{16}g(x+1, y-1) - \frac{1}{8}g(x+1, y) - \frac{1}{16}g(x+1, y+1) \right\}. \quad (4)$$

2.2 焦点定位算法

自动对焦的另一个核心问题是焦点定位算法。评价函数确定以后,系统的实时性与焦点定位算法有很大的关系。好的焦点定位算法能在很短的时间内定位至最大评价函数值处,节省搜索时间,从而提高系统的实时性。目前常用的极值搜索算法有:遍历搜索法、Fibonacci 与黄金分割法、函数逼近法和爬山搜索法等几种。其中爬山搜索法在自动对焦的过程中使用较为广泛^[9]。其基本原理如图 2 所示。

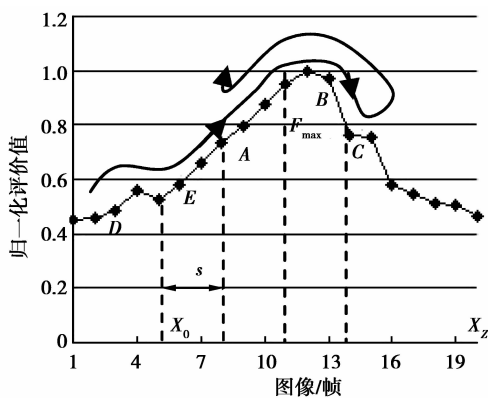


图 2 爬山搜索法示意图

其具体实现过程为:

1) 假设镜头起始位置为 X_0 , 且该点聚焦评价价值为 F_0 。

2) 镜头从起始位置以步长 s 向右运动, 到达位置 E 处, 计算该点聚焦评价价值 F_E 。若 F_E 大于 F_0 , 则聚焦方向正确, 保持运动方向不变。同时令 F_0 等于 F_E , X_0 等于 E 。若 F_E 小于 F_0 , 表示镜头已经越过最佳对焦点, 此时变换镜头运动方向, 并减小步长 s 反向搜索。

3) 重复步骤 2, 直至步长减小到某一限定水平以下即可停止搜索。此时认为镜头位置即为最佳对焦点。

如图 2 所示, 设搜索区域为 (X_0, X_2) , 搜索步长为 s , 则平均搜索次数为 $(s + X_2 - X_0) / 2s$ 。显然, s 应选择恰当, 若 s 太小, 则算法费时较多, 影响系统的实时性要求; 若 s 较大, 则无法保障对焦精度。此外, 若 s 及起始位置选取不当, 该算法还容易陷入局部极值而停止搜索, 如起始位置为图 2 中 D 点时, 则将产生局部峰值而造成误判。

3 基于改进 Roberts 评价函数的自动对焦

3.1 图像预处理

成像系统易受到噪声的影响而使图像发生退化, 如加性噪声、脉冲噪声等。因此进行对焦评价之前应先对采集的图像进行滤波降噪预处理。中值滤波是基于排序统计理论的一种有效滤波去噪技术, 它可在滤除脉冲干扰及椒盐噪声的同时, 保持图像的边缘信息^[10]。这里选择中值滤波算法对图像进行预处理。

点 (x, y) 的 $n \times n$ 邻域的中值滤波表示为

$$g(x, y) = \text{med}\{\text{sort}[g_k(x, y) \mid k = 1, 2, \dots, n^2]\}, \quad (5)$$

式中: $g(x, y)$ 为点 (x, y) 的中值滤波输出灰度值; $g_k(x, y)$ 为点 (x, y) 的第 k 个相邻点的灰度值; $\text{sort}()$ 表示单调排序; $\text{med}()$ 表示取中间值。

3.2 多区域聚焦窗口模式

图像中参与对焦评价函数运算的面积大小影响运算速度, 以至影响整个系统的对焦速度。为了提高对焦速度, 应减少参与运算的图像面积即减少像素数量。此外, 选择对焦窗口进行对焦时, 要尽可能包含主成像目标, 应避免背景部分参与对焦计算, 这样可以屏蔽背景的干扰, 有效提高对焦精度^[11]。

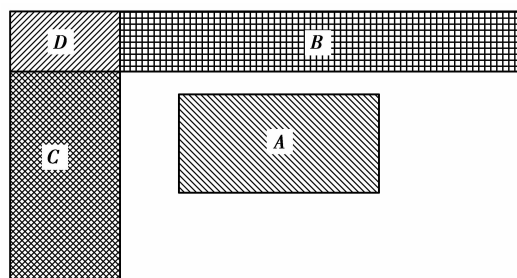


图 3 多区域聚焦评价窗口

以多区域为聚焦窗口可降低对非成像主目标的依赖性^[12-13]。考虑到长边和短边尺寸一般不同, 但图像两两对边(长边对应长边, 短边对应短边)具有相似特性, 因此可以将聚焦评判窗口简化为图 3 中所示的 4 个区域(A、B、C、D, 其中区域 D 为区域 B 和 C 的重叠部分)。针对不同的成像情况, 4 个区域的大小会有相应的变化。

3.3 基于多聚焦窗口和改进 Roberts 评价函数的对焦评判

正确聚焦的图像在空域上表现为边界及细节部分清晰。图像边界部分的灰度值变化则较大。图像相邻区域灰度值变化越明显,图像越清晰。因此,常用邻域像素之间的灰度值差作为图像对焦判据^[14]。

对于相邻的 4 个像素,如图 4 所示,显然,点 (x, y) 3 个方向的灰度梯度变化对该点的图像细节信息均会产生影响。因此,综合考虑这 3 个方向的灰度梯度作为聚焦判据更为有效。

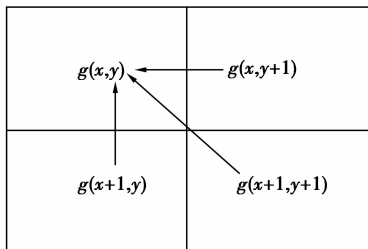


图 4 像素邻域变化示意图

基于上述思想,定义直线上相邻像素点中心距为 1,如图 4 中的点 (x, y) 与点 $(x, y+1)$ 之间的距离;相对角的 2 个像素中心距为 $\sqrt{2}$,如点 (x, y) 与点 $(x+1, y+1)$ 间的距离,于是可将式(3)的 Roberts 评价函数表达式为

$$F = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \left\{ |g(x, y) - g(x+1, y)| + |g(x, y) - g(x, y+1)| + \frac{1}{\sqrt{2}} |g(x, y) - g(x+1, y+1)| \right\} \quad (6)$$

采用式(6)分别计算图 3 中 A、B、C、D 4 个聚焦区域的评价值,其相应的值用 F_A, F_B, F_C, F_D 表示,可得到整幅图像的综合评价值 F 为

$$\begin{cases} F = k_1 * F_A + k_2 * F_B + k_3 * F_C - \frac{k_2 + k_3}{2} * F_D, \\ k_1 + k_2 + k_3 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

其中 k_1, k_2, k_3 为 A、B、C 3 个区域的评价值分别在综合评价中的权重(均为正数);因 D 区域为 B 和 C 区域的重叠部分,故其权重表示为 $-(k_1 + k_2)/2$ 。考虑到中心区域为重要区域,因此 A 的权重 k_1 应大于 k_2, k_3 。

3.4 全局搜索法与二分法相结合的焦点峰值搜索方法

实现快速自动聚焦的关键之一是采用合适的搜索算法快速找到峰值点的位置。常用的峰值搜索方法大多是通过调节镜头的位置并对各个位置的评价

函数值做对比,这种方法可近似认为是一维的搜索过程。从数学理论方面讲,一维极大值的求取方法的每一步迭代都是对所求极大值点的逐步逼近,逼近的方法很多,根据搜索的步长定义方法不同而不同。对焦评价函数随焦距(决定对焦精度)的分布曲线是单峰曲线。这里采用大步长全局搜索法与二分法相结合的峰值搜索方法^[15]。该方法不仅可以避免陷入局部极值,还可以提高搜索速率。

相对图 2 所示的搜索过程,笔者所提方法的计算过程为:

1) 确定搜索初始位置 x_0 , 计算初始位置的对焦评价值 $F(x_0)$, 并初始化最大评价值令 F_{\max} 等于 $F(x_0)$, 对应位置 X_{\max} 等于 x_0 ; 确定步长 s , 允许搜索的最大行程所对应的终止位置 x_z , 状态转换显著性水平 $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 以及步长 s 所允许的上限值 β 。

2) 步进 s , 到搜索位置 x_i , 并计算其聚焦评价数值 $F(x_i)$ 。

3) 当 $F(x_i) \leq F_{\max} * \alpha$ 或者 $x_i \geq x_z$ 时, 跳至步骤 4。否则令 F_{\max} 为 $F(x_i)$, X_{\max} 为 x_i , 重复步骤 2、3。

4) x_0 为 $x_{\max} - s$, 终止位置 x_z 为 $x_{\max} + s$, 重新设置步长 s 为 $(x_z - x_0)/4$ 。

5) 判断步长 s 是否低于规定水平 β 。若 s 小于 β , 则对焦完成, 否则跳至步骤 2。

其流程如图 5 所示。

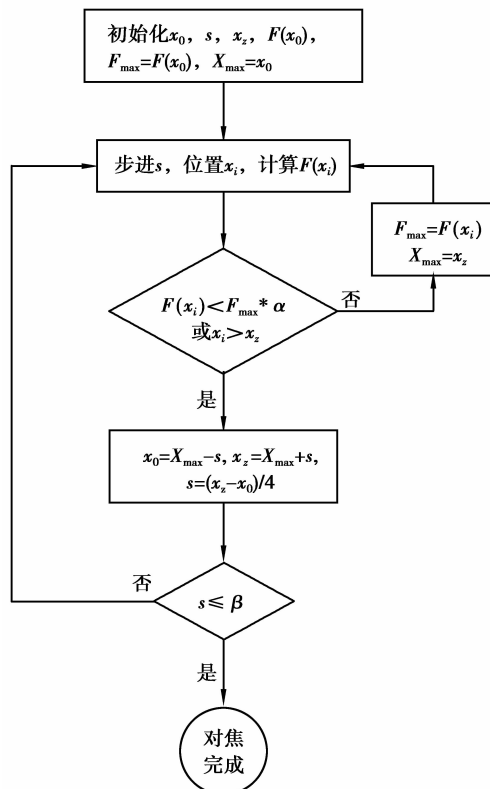


图 5 焦点搜索流程图

分析上述过程,可以看出在进行二分法查找时,每查找一次至少去掉 1/2 的搜索范围,从而减少了对焦过程的时间和计算量。

4 实验结果及分析

采集 20 帧大小为 640×480 的序列图像作为实验图像,此 20 帧图像按照离焦—聚焦—离焦的过程采集。图 6 为试验图片中具有代表性的 3 幅。其中图 6(a)为第 1 帧图片,图 6(b)为第 12 帧图片,图 6(c)为第 20 帧图片。利用式(6)、(7),并设置聚焦窗口系数为 $k_1=0.5, k_2=0.3, k_3=0.2$,得到聚焦评价价值分别为 787,5 416,1 129,通过评价价值的比较,能很好地反映系统的聚焦情况。

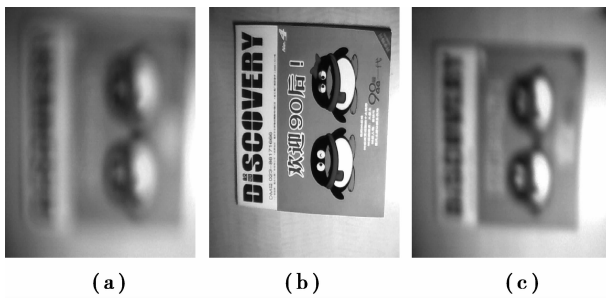


图 6 试验图片

利用式(6)的聚焦评价函数,对本文中的多聚焦窗口和整幅图像作为对焦区域进行对比试验,二者的对焦评价函数曲线(评价价值归一化处理后)如图 7 所示。其中多聚焦窗口中各区域的权重系数分别为 $k_1=0.5, k_2=0.3, k_3=0.2$ 。

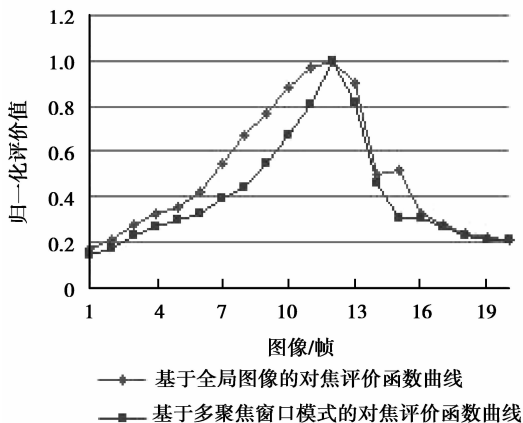


图 7 对焦窗口选择对评价效果影响曲线

由图 7 可以看出,采用多区域方法对焦可以使曲线获得更好的单峰特性,有效提高对焦的准确性;同

时可使图像处理的数据量大大减少,提高对焦速度。

将提出的对焦评价方法分别与式(2)、(3)、(4)中的评价方法做比较,可得到如图 8 所示的评价曲线(归一化后)。

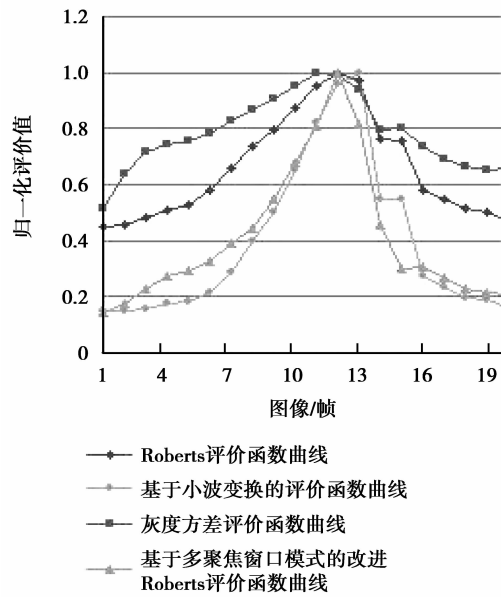


图 8 对焦评价函数性能对比曲线

由图 8 可以看出,灰度方差评价函数和 Roberts 评价函数单峰性不明显,在进行焦点位置搜索时需要更多的搜索次数,对焦效率不高。基于小波变换的评价函数在峰值两侧虽然单调性明显,但峰值处变化平缓,对精确对焦存有影响,另外基于小波变换的评价函数计算量大,并且与肉眼视觉特性不符。笔者提出的基于多区域的改进 Roberts 评价函数的自动对焦方法可获得对称性较好对焦评价曲线,且具有明显的单峰性,计算量小,能有效地兼顾准确性,快速性,有效性。

5 结论

笔者在 Roberts 梯度算法的基础上,提出了基于多区域的改进 Roberts 评价函数的自动对焦方法。该方法将评价图像分为主要区域和次要区域,并根据重要程度赋予不同的区域以不同的评价权重系数;然后对每个区域分别计算 Roberts 梯度评价价值;最后以加权和作为图像的聚焦评价价值。对焦过程中,采取全局搜索与二分法结合的方法,实现评价价值峰值搜索。试验表明提出的方法减小了计算量,提高了聚焦评价速度;获得了单峰性更加明显的对焦评价曲线,使聚焦稳定性和灵敏性提高。焦点搜索方法进一步提高了自动对焦的速度。

参考文献:

- [1] 孙杰,袁跃辉,王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较[J]. 光学学报,2007,27(1):35-39.
SUN JIE, YUAN YUE-HUI, WANG CHUAN-YONG. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocusing criterion[J]. Acta Optica Sinica,2007,27(1):35-39.
- [2] LIU L S, SUN S H, LU N G. Study on the selection method of focusing function in vision system [J]. Journal of Beijing Institute of Machinery,2008,23(1):1-4.
- [3] FENG Q, HAN K, ZHU X C. An auto-focusing method for different object distance situation [J]. International Journal of Computer Science and Network Security,2007,7(6):1-3.
- [4] YOUSEFI S, RAHMAN M, KEHTAMAYAZ N, et al. A new auto-focus sharpness function for digital and smart-phone cameras[C]// Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, United States. [S. l.]: IEEE Press, 2011:475-476.
- [5] FAN Z G, CHEN S Q, HU H L, et al. Autofocus algorithm based on Wavelet Packet Transform for infrared microscopy [C] // Proceedings of 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP2010), Yantai, China. [S. l.]: IEEE Press, 2010: 2510-2514.
- [6] LEE S Y, KUMAR Y, CHO J M, et al. Enhanced autofocus algorithm using robust focus measure and fuzzy reasoning [J]. Circuits and Systems for Video Technol, 2008,18 (9):1237-1246.
- [7] 康牧,许庆功,王宝树. 一种 Roberts 自适应边缘检测算法[J]. 西安交通大学学报,2008,42(10):1240-1244.
KANG MU, XU QING-GONG, WANG BAO-SHU. A Roberts' adaptive edge detection method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(10):1240-1244.
- [8] 张震,刘天立,张斌,等. 一种变物距的自动对焦方法[J]. 机电一体化,2010,16(4):66-69.
ZHANG ZHEN, LIU TIAN-LI, ZHANG BIN, et al. An auto-focus method by changing subject distance [J]. Mechatronics,2010,16(4):66-69.
- [9] 段守胜,李勇滔,谢家仪,等. SEM 自动聚焦系统设计[J]. 现代科学仪器,2009,8(4):21-24.
DUAN SHOU-SHENG, LI YONG-TAO, XIE JIA-YI, et al. Design of SEM autofocus system. modern [J]. Scientific Instruments,2009,8(4):21-24.
- [10] 张玉敏,宋高俊. 基于 ARM-linux 的显微镜自动对焦系统研究[J]. 微计算机信息. 2009,25(8-2):100-102.
ZHANG YU-MIN, SONG GAO-JUN, Research of microscope AF system based on ARM-linux [J]. Control & Automation,2009,25(8-2):100-102.
- [11] YIN P, JIANG W. Autofocusing Region Selection for Computer Vision [C] // Proceedings of 9th International Conference on Signal Processing (ICSP 2008), Beijing, Tai yuan, China. [S. l.]: IEEE Press, 2008:1364-1367.
- [12] 王勇,谭毅华,田金文. 一种新的图像清晰度评价函数[J]. 武汉理工大学学报. 2007,29(3):124-126.
WANG YONG, TAN YI-HUA, TIAN JIN-WEN. A new kind of sharpness-evaluation-function of image [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29 (3): 124-126.
- [13] LIU L J, ZHENG Y Y, FENG J Q, et al. A fast auto-focusing technique for multi-objective situation [C] // Proceedings of 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010), Tai yuan, China. [S. l.]: IEEE Press, 2010, 1: 607-610.
- [14] JEON J, YOON I, KIM D, et al. Fully digital auto-focusing system with automatic focusing region selection and point spread function estimation [J]. Consumer Electronics,2010,56(3):1204-1210.
- [15] HEDBERG H, KRISTENSEN F, OWALL V. Low-complexity binary morphology architectures with flat rectangular structuring elements [J]. Circuits Systems, 2008,55(8):2216-2225.

(编辑 张 苹)