

文章编号: 0253-2239(2010)12-3435-06

基于微分图像自相关的自动对焦法

黄 艳 徐巧玉 叶 东* 车仁生

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 快速自动对焦是机器视觉和数字视频系统中的关键技术。根据光学离焦成像模型,提出了一种基于微分图像自相关的快速自动对焦方法。首先利用拉普拉斯算子对离焦图像进行无方向二阶微分并求微分图像的自相关,然后从自相关图的环形槽鉴别出光学系统点扩展函数的半径,即离焦图像的弥散斑半径,最后依据离焦图像弥散斑半径与离焦量的几何光学关系推导出光学系统正确的对焦位置。实验结果显示该方法适用了任何目标,能够以较高的精度估计出弥散斑半径,并推导出离焦量,从而实现快速自动对焦。这种算法仅需要2幅离焦图像,相对于传统的基于图像清晰度评价函数的对焦方法,减少了计算量,提高了速度,降低了系统复杂度。

关键词 成像系统;自动对焦;弥散斑半径;点扩散函数;自相关

中图分类号 TB877 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103012.3435

Auto-Focus Method Based on Autocorrelation of Derivative Image

Huang Yan Xu Qiaoyu Ye Dong Che Rensheng

(Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Fast auto-focusing technology is a crucial technology in computer vision and digital video system. A novel rapid auto-focusing method is proposed according to the model of optical defocusing system by using autocorrelation of derivative image. Firstly, a Laplacian operator is used to search an isotropic second-order differential to the defocused image and get the autocorrelation of the derivative image. Then, the radius of point spread function, that equals the blur's radius of the defocused image, can be obtained from the annular groove of the autocorrelation. Finally, the right focus position can be deduced from the geometric relation between the radius of blurred spot and the defocusing value. The experimental results show that this proposed method can accurately estimate the radius of blurred spot and the right focus position for any target. Compared with the traditional methods based on focus criteria functions, this method only needs 2 defocused images that reduce the computation quantity and simplify the system to meet the fast auto focusing requirement.

Key words imaging systems; auto focus (PSF); radius of blurred spot; point spread function; autocorrelation

1 引 言

由于大部分视觉任务需要理想的图像,所以获取场景的清晰图像成为计算机视觉的关键技术。在图像成像过程中,非共轭成像系统造成的图像边缘模糊往往是图像退化的主要原因,为了获得清晰的图像,多用自动对焦方法使物距、像距和焦距快速满足共轭关系。根据调节方法不同有三种对焦方法^[1]:1)调节成像目标与镜头的相对位置,即改变物

距;2)调节图像传感器的位置,即改变像距;3)调节镜头焦距。对于不同的应用场合,也可以同时改变其中的几个量。

通常基于图像处理的自动对焦法分为聚焦深度法(DFP)^[2]和离焦深度(DFD)法^[3]。DFP是一种建立在搜索算法上的自动对焦法,它通过一个评价函数对不同对焦位置所成像的清晰度进行评价,利用正确对焦位置时图像最清晰这个特征找到正确对

收稿日期: 2010-03-24; 收到修改稿日期: 2010-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(51075095)资助课题。

作者简介: 黄 艳(1981—),女,博士研究生,主要从事计算机视觉测量方面的研究。E-mail: huangyan_hit@163.com

导师简介: 车仁生(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事计算机视觉测量及质量工程等方面的研究。

E-mail: crs@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yedong@hit.edu.cn

焦位置^[4~8]。这类方法往往要搜索 10 幅以上图像才能找到正确对焦位置,速度较慢且实时性差。DFD 法是一种从离焦图像中获取弥散斑半径并推导出离焦量从而完成自动对焦的方法。它最少只需要 2 幅离焦图像就可实现自动对焦。早期的 DFD 法多是基于离焦图像直边响应的^[9],因此对场景有一定要求,实用性不大。另一类是针对任意物体的^[10],这类方法往往基于衍射受限系统,以便观察衍射在离焦图像的频谱上形成的明暗分布来估计弥散斑半径。

本文提出的是一种针对任意物体的 DFD 法,对成像系统没有过多要求,只用简单的图像处理估算弥散斑半径,然后根据弥散斑半径与离焦量的几何关系推导正确的对焦位置。

2 算法原理

光学系统对焦过程即是使物距、像距和焦距满足共轭关系的过程,即获得最小的弥散斑。根据几何光学关系建立弥散斑半径与像距离焦量的关系,简化的光学成像系统如图 1 所示。该光学系统的焦距、物距、像距和孔径光阑分别由 f, u, v, D 表示。

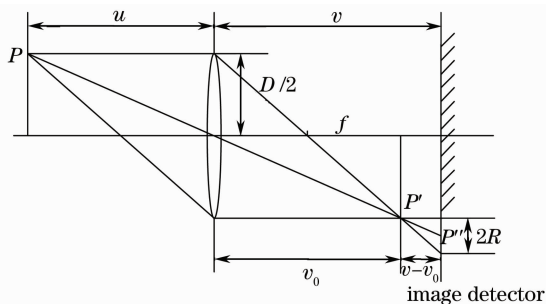


图 1 简化凸透镜光学成像系统

Fig. 1 Simplified imaging system with a convex lens

当成像系统离焦时点光源在像面形成弥散斑,假设离焦弥散斑半径为 R ,根据透镜定律,有

$$R = \frac{vD}{2} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{u} - \frac{1}{v} \right). \quad (1)$$

为便于描述约定如下坐标系,像方以标准景像平面为原点,远离镜头方向为正方向;物方以对准平面为原点,远离镜头方向为正方向。当物距 u_0 固定时,图像接收器(ID)处于标准景象平面 v_0 之后,即 $0 \leq v \leq v_0$ 时弥散斑半径 $R \leq 0$,像面处于景像平面 v_0 之前,即 $v \geq v_0 \geq 0$ 时弥散斑半径 $R \geq 0$,如图 2 所示。根据几何光学共轭关系可知,此时像距的离焦量

$$\Delta S(R, u_0) = v_0 - v = \frac{-2Rf u_0}{D(u_0 - f)}, \quad (2)$$

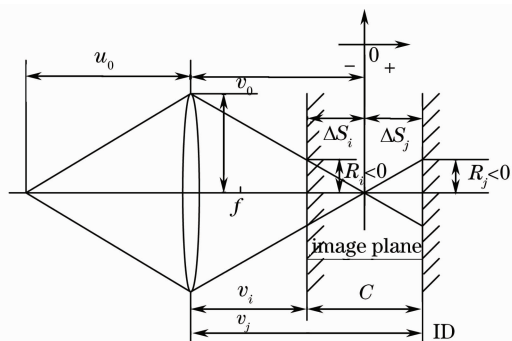


图 2 带坐标系的成像系统

Fig. 2 Imaging system with coordinate system

若同时检测出两幅离焦图像的弥散斑半径及 ID 在两个位置的位移差 $C = v_j - v_i$,则正确对焦位置

$$v_0 = \frac{D(v_i - v_j)}{2(R_i - R_j)} = \frac{-DC}{2(R_i - R_j)}, \quad (3)$$

由(2),(3)式可得 ID 在 i_{th} 位置时的像距离焦量为

$$\Delta S_i = \frac{R_i(v_j - v_i)}{(R_i - R_j)} = \frac{R_i C}{(R_i - R_j)}. \quad (4)$$

根据先前的约定, ID 向远离镜头方向移动时 $C > 0$,否则 $C < 0$;同理,当 $\Delta S > 0$ 时,向远离镜头方向调整 ID,否则调整 ID 靠近镜头。

在实际运用中,两幅或者更多离焦图像的 ID 位移差 C 可由镜头传动机构给出,因此 DFD 法的关键是获取带符号的弥散斑半径 R 。应该指出的是这种几何关系适用于物距远大于像距,仅需调节像距的情况,例如摄像系统。显然此时像距离焦量与焦距没有关系,函数关系是线性的,易于利用。

3 鉴别离焦图像弥散斑半径

DFD 法的关键是获取带符号的弥散斑半径 R , R 的符号可由物距估计值和焦距,镜头传动机构的移动方向及 R 的大小情况快速判断出来。

3.1 图像退化模型

由于成像系统可以看作是一个线性系统,因此成像系统的离焦过程就是一种图像退化过程,图像的退化过程可以表示为

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y), \quad (5)$$

式中 $g(x, y)$ 为退化图像, $f(x, y)$ 为清晰图像, $h(x, y)$ 为点扩展函数(PSF), $n(x, y)$ 为加性噪声, $*$ 表示卷积。

对于几何光学成像系统的 PSF,典型的均匀扩散模型^[11]是从几何光学出发,认为在弥散斑内部亮度是均匀一致的,在弥散斑外部亮度为 0,由此 PSF 可以近似表示为

$$h(x, y) = \begin{cases} 1/(\pi R^2), & x^2 + y^2 \leq R^2 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

显然,鉴别出退化图像 PSF 半径即可以鉴别出弥散斑半径。

成像系统的 PSF 的估计问题已经有许多办法,例如早期的基于直边响应的估计方法^[12]、近期的基于奇异值分解的估计方法^[13]、陈前荣等^[14]用微分图像的自相关估计离焦图像的 PSF 以及赵琳等^[15]将该方法与超分辨率图像复原算法结合起来应用于图像的盲复原等。

3.2 退化图像二阶无方向微分自相关分析

对于退化模型不考虑噪声,则有

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y), \quad (7)$$

对退化图像 $g(x, y)$ 进行无方向的二阶微分,有

$$\begin{aligned} \nabla^2 g(x, y) &= \nabla^2 \iint f(\alpha, \beta) h(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta = \\ &= \iint f(\alpha, \beta) \nabla^2 h(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta = \\ &= f(x, y) * \nabla^2 h(x, y), \end{aligned} \quad (8)$$

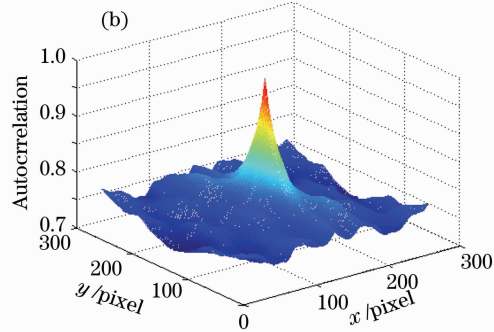
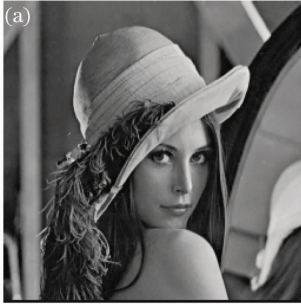


图 3 (a) 原始清晰图像, (b) 原始图像的自相关

Fig. 3 (a) Original sharp image, (b) autocorrelation of original image

由(6)式可知,均匀 PSF 是圆对称函数,在极坐标系 $[r \in (-\infty, +\infty), \theta \in (0, 2\pi)]$ 中,该函数可改写为

$$h(r, \theta) = h_R(r) = \begin{cases} \frac{1}{\pi R^2}, & |r| \leq R \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (11)$$

显然,它只是半径 r 的函数,则这个圆域函数的傅里叶-贝塞尔变换可以写成

$$H(\rho) = \frac{J_1(2\pi R\rho)}{\pi R\rho}. \quad (12)$$

式中 J_1 是一阶第一类贝塞尔函数。显然对 $h(r, \theta)$ 的无方向微分即 $\nabla^2 h(r, \theta)$ 的取值也具有圆对称性,与 θ 无关。根据傅里叶变换的微分特性,可以得出 $\nabla^2 h(r, \theta)$ 的傅里叶-贝塞尔变换为

根据自相关理论(\otimes 为自相关运算符),退化图像二阶无方向微分自相关表示为

$$\begin{aligned} S_{\nabla^2 g} &= \nabla^2 g(x, y) \otimes \nabla^2 g(x, y) = \\ &= [\nabla^2 g(-x, -y)]^* * \nabla^2 g(x, y), \end{aligned} \quad (9)$$

将(8)式代入(9)式,有

$$\begin{aligned} S_{\nabla^2 g} &= [f(x, y) \otimes f(x, y)] * \\ &= [\nabla^2 h(x, y) \otimes \nabla^2 h(x, y)] = S_f * S_{\nabla^2 h}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 S_f 是原始清晰图像 $f(x, y)$ 的自相关,通常表现为对称单峰函数。 $S_{\nabla^2 h}$ 是微分 PSF $\nabla^2 h(x, y)$ 的自相关。(10)式表明,退化图像二阶无方向微分自相关是原始清晰图像自相关与微分 PSF 自相关的二维卷积。

清晰图像通常可以看作无方向性的一阶马尔可夫过程,它的自相关 S_f 三维显示通常表现为中心有个尖锐的圆锥状相关峰,远离中心部分起伏较小。图 3(a) 是一幅 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的清晰图像,图 3(b) 为其自相关。

$$G(\rho) = -\rho^2 H(\rho) = -\frac{\rho J_1(2\pi R\rho)}{\pi R}, \quad (13)$$

根据维纳-辛钦定理,微分 PSF $\nabla^2 h(x, y)$ 的自相关 $S_{\nabla^2 h}$ 表示为

$$S_{\nabla^2 h_R(r)} = F^{-1}[|G(\rho)| * |G(\rho)|] = F^{-1}[|G(\rho)|^2], \quad (14)$$

由贝塞尔函数特性可知, $S_{\nabla^2 h}$ 必然也具有圆对称性,并含有一个半径为 $2R$, 由负尖峰连成的环形槽。

图 4(a) 是 $R = 10 \text{ pixel}$ 时的点扩展函数,图 4(b) 是其微分自相关 $S_{\nabla^2 h}$ 。从图中可以观察到 $S_{\nabla^2 h}$ 存在一个由负的尖峰连成的环形槽,它以零频尖峰为圆心,半径为 $2R$ 。

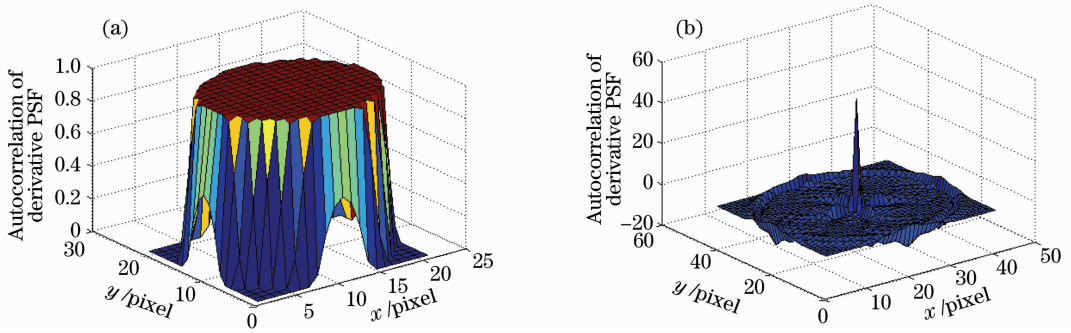


图 4 (a) PSF, (b) PSF 二阶微分自相关

Fig. 4 (a) PSF, (b) autocorrelation of second-order derivative PSF

分析 $S_{\nabla^2_g} = S_f * S_{\nabla^2_h}$, 当 $S_{\nabla^2_h}$ 远离 S_f 的零频尖峰时, $S_{\nabla^2_g}$ 在 0 值附近, 波动不会很大; 当 $S_{\nabla^2_h}$ 靠近 S_f 的零频尖峰时, 不会改变 $S_{\nabla^2_h}$ 的基本轮廓, 即在零频尖峰邻域, $S_{\nabla^2_g}$ 与 $S_{\nabla^2_h}$ 的基本轮廓相同。综合起来在 $S_{\nabla^2_g}$ 中必定也像 $S_{\nabla^2_h}$ 一样存在一个半径为 $2R$, 由负尖峰连成的环形槽, 且其半径易于数值鉴别。

图 5(a)是图 3(a)的离焦退化图像, 它对应的 PSF 的圆柱形半径 $R=10$ pixel。图 5(b)是该离焦图像的无方向微分自相关归一化图, 可以看出中心有一个环形槽, 其半径是 PSF 的圆柱形半径的两倍。图 5(c)是图 5(b)主峰沿坐标轴的剖面曲线, 其两个负尖峰之间的距离正是 $4R$, 该结果与上文分析相符。

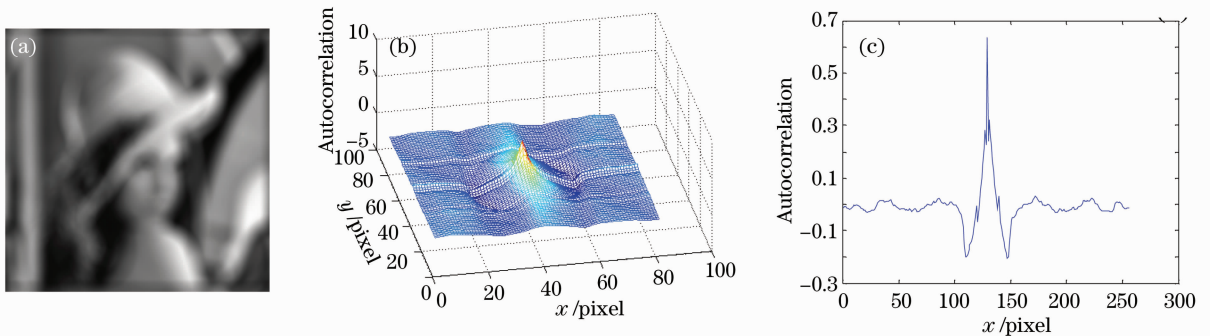


图 5 (a)离焦退化图像, (b)离焦退化图像微分的自相关, (c)通过自相关峰值的切面图

Fig. 5 (a) Defocused blurred image, (b) autocorrelation of derivative defocused blurred image, (c) slit of autocorrelation through central peak

显然只要鉴别出了 $S_{\nabla^2_g}$ 的由负的尖峰连成的环形槽半径 r , 即可鉴别出光学系统 PSF 的半径 $R = r/2$, 由上节结论也即鉴别出了弥散斑的半径。算法首先利用拉普拉斯算子对退化图像进行无方向性的二阶微分, 并用快速二维傅里叶变换计算微分图像自相关 $S_{\nabla^2_g}$, 最后通过插值, 将自相关的分布由直角坐标系转化到极坐标系, 求和得到一条由负尖峰构成的鉴别曲线, 弥散斑半径即为该鉴别曲线半径的一半。

轨上后, 调整相机移动并采集 8 幅以上离焦图像。图 6(a), (b)分别是对光斑和箭头的聚焦与散焦图像。

4 实 验

为了验证提出的自动对焦方法, 搭建了简单的光路图。如图 1 所示, 普通光源透过带孔的光屏作为成像物体, 通过焦距和孔径已知的透镜成像于柯达 (Kodak) 的 Megatlus1. 4I 型号相机的 CCD 平面, 该 CCD 的像素尺寸为 0.068 mm。固定物体与透镜于导

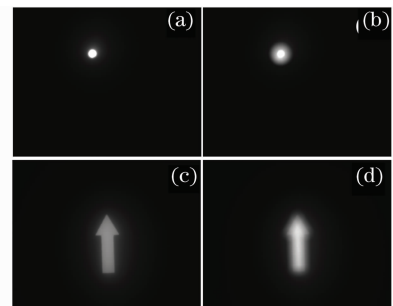
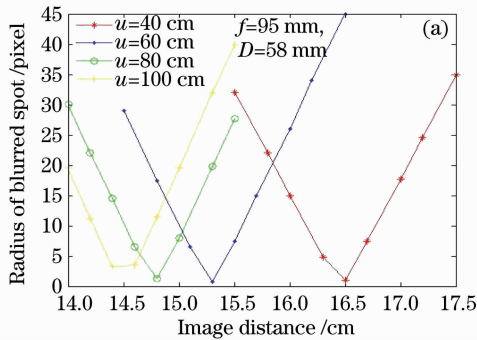


图 6 (a) 光斑的清晰像, (b) 光斑的离焦模糊像, (c) 箭头的清晰像, (d) 箭头的离焦模糊像

Fig. 6 (a) Sharp image of spot, (b) defocused blurred image of spot, (c) sharp images of arrow, (d) defocused blurred image of arrow

用本文提出的方法对多组不同成像参数下的图像进行二阶微分自相关并提取其负尖峰环形槽半径。图 7 给出了在不同像距下图像的弥散斑半径。

由图 7 可见,计算所得弥散斑半径与像距在大部分位置成很好的线性关系,符合(1)式,证明了方



法的可行性。但是在像距接近正确对焦位置时,误差增大。

表 1 给出由不同成像参数下的 8 幅离焦图像计算出的对焦位置 v , 其中 V_0 是由物距和焦距计算出的理论值。

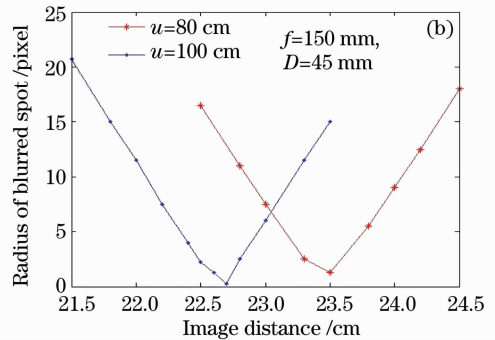


图 7 不同参数下弥散斑半径

Fig. 7 Radius of blurred spot at different parameters

表 1 8 幅离焦图像计算的对焦位置

Table 1 Focus positions calculated from 8 defocused blurred images

	$f=95 \text{ mm}, D=58 \text{ mm}$				$f=150 \text{ mm}, D=45 \text{ mm}$	
U_0/cm	40	60	80	100	80	100
V_0/cm	12.459	11.287	10.78	10.479	18.462	17.647
v/cm	12.462	11.287	10.776	10.50	18.452	17.652

为了实现快速对焦,分别对多幅图像计算对焦位置,如图 8 所示。从图中可以看出,当所用的图像越多时,对焦精度越高,只使用 2 幅图像计算时,绝对误差在 0.11 cm 内。

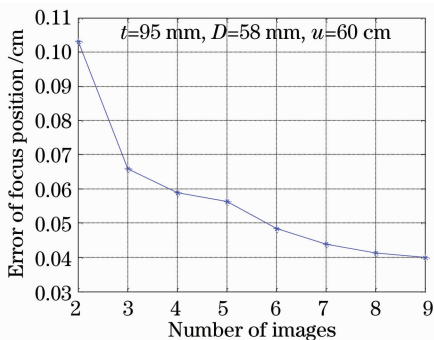


图 8 误差随图像数目变化

Fig. 8 Errors of focus position versus number of images

在实际对焦过程中,可以使用本文方法用 2 幅图像快速估计对焦位置,再结合基于清晰度函数评价的方法实现细调,可在保证对焦精度的同时提高对焦速度。

5 结 论

提出了一种新的自动对焦方法,利用拉普拉斯算子对模糊图像进行二阶微分,然后从二阶微分图

像自相关中提取光学系统的 PSF 半径,也即弥散斑半径,最后根据几何光学的共轭原理计算出正确的对焦位置。实验结果证明,该方法能由 2 幅离焦图像估计出正确对焦位置,绝对误差在 0.11 cm 内,减小了计算量,提高了自动对焦效率。但是应该注意到此方法在靠近对焦位置时误差增大,结合基于清晰度评价函数的自动对焦方法可以改善细调精度。

参 考 文 献

- 1 Yuan Yukai, Cheng Shidong, Pei Yuntian. Influence of defocus on automatic focusing evaluation function [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(12): 51~58
- 2 原育凯,程仕东,裴云天. 光学系统离焦对自动调焦评价函数的影响 [J]. *光电工程*, 2005, **32**(12): 51~58
- 3 Y. L. Xing, S. A. Steven. Depth from focusing and defocusing [C]. *Proceeding of IEEE Computer Society Conference on CV and PR*, New York, 1993: 68~73
- 4 M. Subbarao, G. Surya. Depth from defocus, a spatial domain approach [J]. *International J. Computer Vision*, 1994, **13**(3): 271~294
- 5 Zong Guanghua, Sun Minglei, Bi Shusheng *et al.*. Research on autofocus technique in micro-vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1225~1232
- 6 宗光华,孙明磊,毕树生等. 显微视觉自动聚焦研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1225~1232
- 5 Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocus criterion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 35~39
- 6 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
- 6 Qu Yufu, Pu Zhaobang, Zhao Huijie *et al.*. Influence factor analysis of sensitivity of focus criteria function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 902~906
- 屈玉福, 浦昭邦, 赵慧洁等. 调焦评价函数灵敏度的影响因素分析 [J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 902~906
- 7 Ni Jun, Yuan Jiahu, Wu Qinzhang. Identification for optical image definition based on edge feature [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 172~176
- 倪 军, 袁家虎, 吴钦章. 基于边缘特征的光学图像清晰度判断 [J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 172~176
- 8 Song Kang, Zhang Tao, Liao Junbi. Theoretical analysis of autocorrelation function of image as sharpness evaluation function [J]. *J. Southwest Jiaotong University*, 2008, **43**(5): 578~581
- 宋 康, 张 涛, 廖俊必. 图像自相关函数作为清晰度评价函数的理论分析 [J]. 西南交通大学学报, 2008, **43**(5): 578~581
- 9 Liu Yipeng, Pei Xiyu, Feng Huajun *et al.*. Autofocus algorithm based on depth from defocus [J]. *Optical Instrument*, 2005, **27**(4): 39~44
- 刘义鹏, 裴锡宇, 冯华君等. 一种基于 DFD 的自动对焦算法 [J]. 光学仪器, 2005, **27**(4): 39~44
- 10 Pei Xiyu, Feng Huajun, Li Qi *et al.*. A depth from defocus auto-focusing method based on frequency analysis [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(5): 62~65
- 裴锡宇, 冯华君, 李 奇等. 一种基于频谱分析的离焦深度自动对焦法 [J]. 光电工程, 2003, **30**(5): 62~65
- 11 Li Qi, Feng Huajun, Xu Zhihai. Performance analysis and evaluation of point spread function for full digital autofocus [J]. *J. Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, **40**(6): 1093~1096
- 李 奇, 冯君华, 徐之海. 用于全数字对焦的点扩散函数性能分析与评价 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, **40**(6): 1093~1096
- 12 F. Rooms, M. Ronsse, A. Pizurica *et al.*. PSF estimation with application in autofocus and image restoration [C]. Proc. 3rd IEEE Benelux Signal Processing Symposium (SPS-2000), Leuven, Belgium, 2002, March 21-22, s02
- 13 Wang Yuanyuan, Sun Zhimin, Cai Zheng. Estimation of PSF of image system using modified SVD method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **14**(3): 520~526
- 汪源源, 孙志明, 蔡 铮. 改进的奇异值分解法估计图像点扩散函数 [J]. 光学精密工程, 2008, **14**(3): 520~526
- 14 Chen Qianrong, Lu Qisheng, Cheng Lizhi *et al.*. Identification of the point spread function from the defocus image using the Laplacian operators [J]. *Computer Engineering & Science*, 2005, **27**(9): 40~43
- 陈前荣, 陆启生, 成礼智等. 利用拉氏算子鉴别三角模糊图像点扩散函数 [J]. 计算机工程与科学, 2005, **27**(9): 40~43
- 15 Zhao Lin, Jin Weiqi, Chen Yinan *et al.*. Blind restoration for defocus blurred image based on autocorrelation of derivative image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1703~1719
- 赵 琳, 金伟其, 陈翼男等. 基于微分图像自相关的离焦模糊图像盲复原 [J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1703~1719