

〈系统与amp;设计〉

## 基于红外自动聚焦过程的最优函数选取

李璐<sup>1</sup>, 王高<sup>1</sup>, 师钰璋<sup>1</sup>, 郝争辉<sup>2</sup>

(1. 中北大学, 山西太原 030051; 2. 山西戴德测控技术有限公司, 山西太原 030006)

**摘要:** 与可见光自动聚焦系统相比, 红外自动聚焦系统的核心问题在于因红外探测器特殊的成像原理, 聚焦过程被分为由远及近聚焦和由近及远聚焦。针对这两个过程所使用的自动聚焦函数, 在分析各自聚焦函数曲线特征的基础上, 运用灵敏度、陡峭区宽度、陡峭度、平缓区波动量和时间 5 个针对性的评价指标, 对常用的 13 个典型的清晰度评价函数进行定量分析, 提出适合两个聚焦过程的最优函数。结论表明: 在由近及远的聚焦过程中,  $F_{\text{Laplace}}$  可作为该过程的最优函数; 而由远及近的聚焦过程中,  $F_{\text{Laplace}}$  和  $F_{\text{SML}}$  可作为最优函数的选取。

**关键词:** 红外; 自动聚焦; 聚焦函数; 评价指标

中国分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2020)11-1017-05

## Optimal Function Selection Based on Infrared Auto-Focusing Processes

LI Lu<sup>1</sup>, WANG Gao<sup>1</sup>, SHI Yuzhang<sup>1</sup>, HAO Zhenghui<sup>2</sup>

(1. North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Daide Measurement and Control Technology Inc., Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Unlike the visible light auto-focusing system, the infrared auto-focusing system is divided into far-to-near focusing and near-to-far focusing owing to the special imaging principle of the infrared detector. The auto-focusing functions in the two processes are based on the analysis of the characteristics of the respective focusing function curves. To this end, five targeted evaluation indexes are used: sensitivity, the width of the steep part of the focusing curve, steepness, variance of the flat part of the focusing curve, and time. The 13 typical sharpness evaluation functions that are commonly used in quantitative analysis are conducted, and an optimal function suitable for the two focusing processes is proposed. The results show that  $F_{\text{Laplace}}$  can be used as the optimal function in the focusing process from near to far, and  $F_{\text{Laplace}}$  and  $F_{\text{SML}}$  can be used as the optimal function in focusing from near to far.

**Keywords:** infrared, autofocus, focusing-function, evaluation index

### 0 引言

随着红外技术的不断发展, 红外成像技术已经被广泛应用于红外精确制导、预警、视频监控、搜索和跟踪等多种军事及民用领域的成像系统中<sup>[1]</sup>。如今, 随着红外技术和电子技术的发展, 在红外图像处理的基础上进行自动聚焦也得到了较为广泛的应用, 特别是夜间无人驾驶技术。

和可见光自动成像过程不同, 由于红外自动探测

系统是根据目标物表面及背景的热量辐射转换成红外图像, 以此自动识别物体特征, 但是根据红外成像技术的特点, 如果系统聚焦程度达不到聚焦最清晰处, 不仅对识别目标特征有不小的损耗, 而且对温度精度的获取也有影响<sup>[2]</sup>。各类调焦方法的调焦精度、调焦方式、系统复杂度、系统集成度和系统灵活性不同。目前, 常用的自动聚焦技术主要有两种方法, 其一是基于测距原理的主动式聚焦, 但由于受机械系统运动误差的影响一般无法满足要求<sup>[3]</sup>; 其二是基于图

收稿日期: 2019-12-02; 修订日期: 2020-09-08.

作者简介: 李璐(1993-), 女, 青海省西宁市人, 硕士研究生, 主要研究方向: 红外测量与图像处理。E-mail: 2169199062@qq.com。

通信作者: 王高(1973-), 男, 山西侯马人, 教授, 主要研究方向为兵器测试。E-mail: llslbw3323@163.com。

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2014054); 总装基础研究项目; 国家自然科学基金(61573323); 山西应用基础研究项目(201701D121061)。

像处理的被动式聚焦方式,该方法仅利用已获取的序列数字图像分析当前系统的聚焦状态,直到获取最清晰的图像,并且根据上述不同的评价指标,图像处理方法具有其他调焦方法无可比拟的优势,在未来的发展中,该方法最具有发展前景。

本文结合红外图像处理和自动聚焦技术,分别根据由远及近聚焦和由近及远两个聚焦过程,对被动式聚焦方法中最常用的一部分——图像清晰度评价函数进行最优分析和选取:在分析各自聚焦函数曲线特征的基础上,运用灵敏度、陡峭区宽度、陡峭度、平缓区波动量和聚焦函数值的计算时间5个针对性的评价指标,对常用的13个典型的清晰度评价函数进行定量分析,提出适合两个聚焦过程的最优函数。

### 1 聚焦函数的选取

常用的聚焦清晰度评价函数有梯度函数、频域函数<sup>[4]</sup>、统计学函数。

1) 基于梯度算法的应用最为广泛,种类较多,根据计算方法的不同主要有灰度差分函数<sup>[5]</sup>、能量梯度函数、Sobel算子的函数、Tenengrad函数<sup>[6]</sup>、Robert的差分绝对值和函数、Robert的梯度能量函数、拉普拉斯能量的函数、SML函数和Brenner函数。该类算法在一定程度上有很高的灵敏性,计算量也很小,是一种很值得研究的算法<sup>[7]</sup>。

2) 频域函数相当于一个低通滤波过程。常用的函数有二维离散傅里叶变换函数、离散余弦变换函数(Discrete Cosine Transform, DCT)。由于清晰图像的边缘较为尖锐,表现为高频分量较多。所以在频域中,可以将图像内容高频成分的多少作为评价标准。

3) 基于统计学函数。这类函数最典型有Variance方差函数、Vollaths函数。从统计学角度来说,处于聚焦位置的图像包含更多信息,即灰度值分布多样化,而处于离焦的图像的灰度分布较少。

上述几种方法将在本文中分别讨论。根据红外探测器在两个聚焦过程中的序列图像,运用5个评价指标,分析其聚焦函数曲线特征,选择最优函数。

### 2 聚焦函数评价指标

目前,针对自动聚焦函数的评价函数还没有客观的定量指标,只能根据图像序列的聚焦特征曲线,定量对比各聚焦处的清晰度值,曲线的峰值处就是红外聚焦系统成像的最清晰处。

除了前面所述5种评价指标外,还有清晰度比率和局部极值因子,但这两者常用于可见光自动聚焦系统。根据两个指标原理,其并不适用于红外自动聚焦,

所以,应根据本次实验的具体原理,针对性地选择合适的评价指标。并且按照实验目的,各自分析两个聚焦过程的特征,分别选取最优函数。

#### 1) 灵敏度<sup>[8]</sup>

在聚焦函数峰值附近,不同聚焦函数曲线的横坐标同时改变 $\varepsilon$ 时,曲线的纵坐标变化量 $F$ 不同。 $F$ 较大表明:最大值附近函数值变化越剧烈,越容易找到真实的焦平面。灵敏度定义式如下:

$$F = \frac{f_{\max} - f(h_{\max} + \varepsilon)}{f(h_{\max} + \varepsilon)} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon$ 为横坐标变化量,即聚焦距离变化量; $f_{\max}$ 为最大聚焦函数值; $h_{\max}$ 为最大聚焦函数值所处的位置; $f(h_{\max} + \varepsilon)$ 为横坐标变化 $\varepsilon$ 后的聚焦函数值; $F_L$ 、 $F_R$ 分别为聚焦峰值左右两侧的灵敏度。

#### 2) 陡峭区宽度

在调焦过程中,随着离开聚焦峰值,图像越来越模糊,聚焦函数值迅速下降,直到几乎看不清任何内容,继而进入一个平缓区,该阶段函数值无明显变化。为了表征聚焦函数曲线的这种特性,我们将曲线划分为陡峭区和平缓区。

在陡峭区域,聚焦函数值对横坐标聚焦距离的变化非常敏感,而在平缓区域,纵坐标几乎没有任何变化。平缓区又可分为左平缓区和右平缓区,左右平缓区跟陡峭区的分界点分别称为左临界点和右临界点,其坐标分别为 $(z_l, f_l)$ 、 $(z_r, f_r)$ 。找临界点要满足一定的条件,从左至右满足如下第一个点为左临界点:

$$\frac{f_n}{f_{n-1}} > \gamma \quad (2)$$

式中: $\gamma$ 为比例系数,其取值大于1, $f_{n-1}$ 为 $n-1$ 个点的平均清晰度。以此方法从右往左获得右临界点。两个临界点确定后,就可以得到陡峭区宽度:

$$W = |z_l - z_r| \quad (3)$$

#### 3) 陡峭度

聚焦过程的第一离焦阶段和第二离焦阶段不同,因为探测器前后景深的差异和前后接受的辐射量的不同,因此聚焦曲线峰值左右陡峭程度也不同。定义左陡峭度为:

$$S_L = \frac{2(f_{\max} - f_l)}{W} \quad (4)$$

式中: $f_l$ 为左临界点的聚焦函数值; $W$ 为陡峭区宽度。定义右陡峭度为:

$$S_R = \frac{2(f_{\max} - f_r)}{W} \quad (5)$$

式中: $f_r$ 为右临界点的聚焦函数值。

#### 4) 平缓区波动量

由于外界辐射噪声会对评价函数的曲线形状造成影响,所以非理想状况下,平缓区的函数值会出现一定的波动情况,用平缓区波动量来描述波动的大小。该区域的波动量能反映该函数的抗噪性:波动量  $V$  越小,说明该函数的抗噪性越稳定。

$$V = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f}_f)^2} \quad (6)$$

式中:  $N$  为平缓区采样点的个数;  $\bar{f}_f$  为平缓区聚焦函数的均值;  $V_L$ 、 $V_R$  分别为聚焦峰值左右两侧的平缓区波动量。

### 5) 时间

计算时间  $T$  表征某个函数聚焦的速度。由于各函数的计算结果是在特定条件下测试获得的,所以当测试条件改变时,该结果也会改变。

## 3 实验

本次实验的目的是针对红外探测器特殊成像原理,分别对由远及近和由近及远两个聚焦过程的聚焦曲线特征分析,利用合适的评价指标,选择最优函数。

基于上述目的,理论上要分别对两个过程的红外序列图像进行截取,但为了便于对比,本次采用相同热源黑体。如果得到其中一个过程的序列图像,那么按照两个过程的条件和区别,完全可以将该次实验得到的序列图像的函数曲线左右转置,作为另一个过程的函数曲线,进行特征分析,这样可以保证实验条件的相同,避免误差对曲线对比分析有较大影响。

实验截取 100 幅由近及远聚焦过程的红外图像作为分析对象。图 1 是整个实验的其中 5 幅。(a)、(b) 为聚焦前的图像,(d)、(e) 为聚焦后的,(c) 为处于聚焦位置的图像,此时热源边缘轮廓清晰。在整个实验过程中,所得到的图像背景是有一定的灰度值,这是

在辐射过程中,由相机本身的辐射误差和外界其他的辐射误差造成的,导致每张图片背景都呈现一定的灰度值。由于红外探测系统的聚焦程度主要是由其前端的光学透镜与红外探测器之间的位置所决定,所以当红外探测系统聚焦起步时,此时离热源较近,镜头视场内的场景经过光学成像系统时,探测器所处位置与光学透镜聚焦平面位置不一致,则会出现离焦现象;通过调节镜头与探测器之间的位置,随着探测器逐渐接近光学透镜的聚焦平面,所成像的边缘轮廓更加清晰锐利;当探测器慢慢远离光学透镜的聚焦平面,点光源在探测器上所成图像不再是清晰的点光源。

该过程的第一离焦阶段离热源较近,进入透镜视场的热源的聚焦程度较小;越过图 1(c) 的聚焦峰值,进入离焦第二阶段,此时的聚焦面处于热源之前,进入透镜的热源掺杂过多其他来自外界的辐射噪声,由此形成如图 1(d)(e) 的状态。

为了易于各函数的比较,要缩小各指标之间的相对关系,通常需要进行归一化处理。将原始数据线性变换到 [0, 1], 增加指标之间的可比性,转换函数如下:

$$A' = \frac{A - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (7)$$

式中:  $A$  为某个聚焦函数的样本离散值;  $A_{\max}$  和  $A_{\min}$  分别为样本值的最大值和最小值。

## 4 实验结果与分析

本次实验基于 5 个评价指标,对 13 个聚焦函数的曲线特征进行分析;针对两个不同的聚焦过程,选取各自最优函数。

如图 2 为 13 个聚焦函数的特征曲线,图 3 为图 2(a)和(b)的局部特征图,表 1 详细罗列了各个聚焦函数的评价价值。

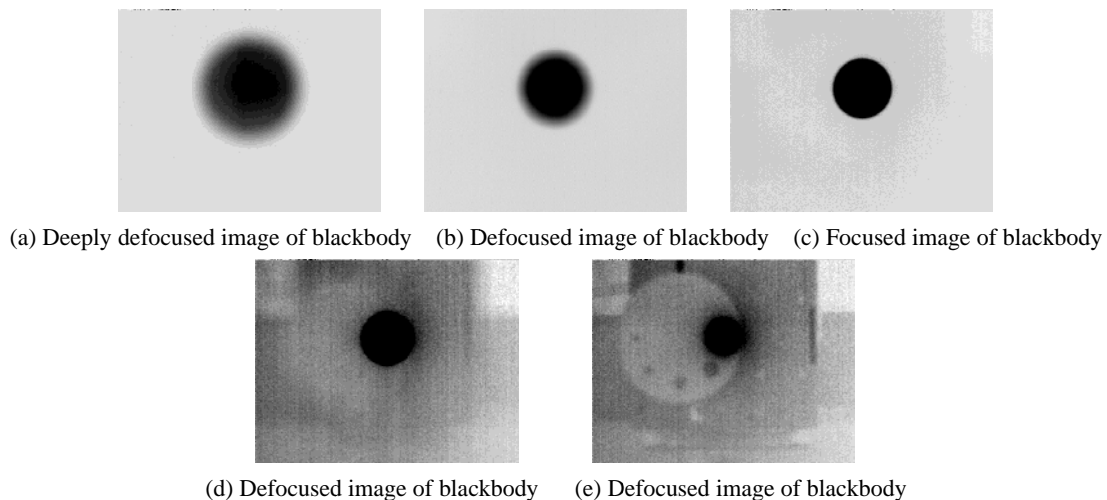


图 1 不同离焦程度情况下的红外图像

Fig.1 Infrared images under different defocusing conditions

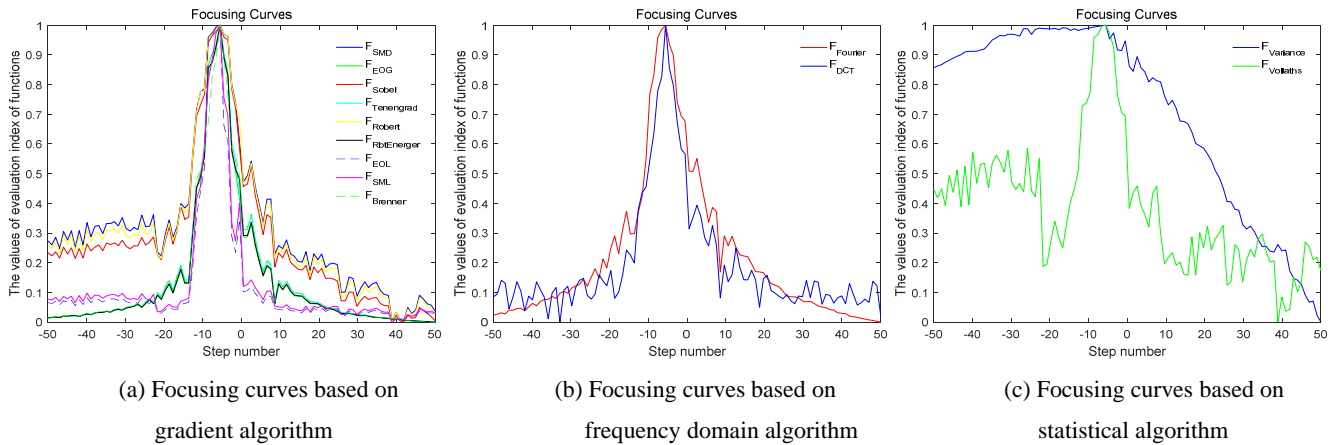


图2 13个聚焦函数的聚焦特征曲线

Fig.2 Focusing characteristic curves of 13 focusing functions

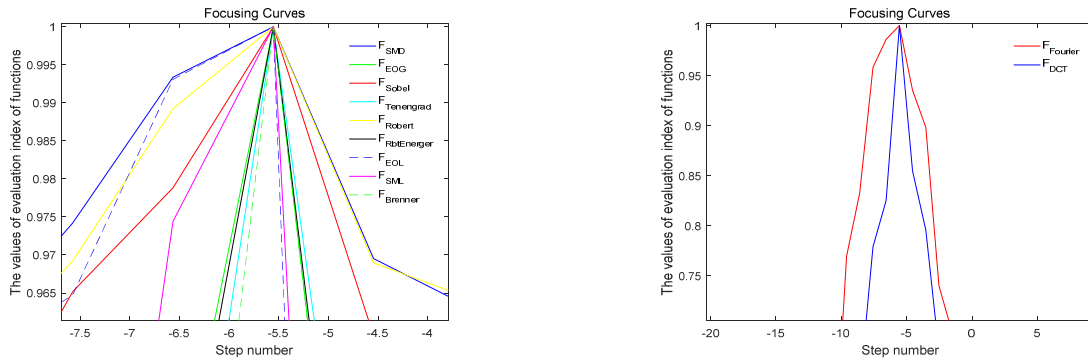


图3 部分聚焦函数的局部特征曲线

Fig.3 Local characteristic curves of partial focusing functions

表1 各聚焦函数曲线的评价指标值

Table 1 Values of evaluation index for curves of focusing functions

	$F_L$	$F_R$	$S_L$	$S_R$	$V_L$	$V_R$	$W$	$T$
$F_{SMD}$	0.292	0.653	0.015	0.020	0.0391	0.1296	15	5.1648
$F_{EOG}$	0.992	1.425	0.021	0.021	0.0374	0.0777	16	5.2770
$F_{Sobel}$	0.369	0.716	0.016	0.020	0.0336	0.1266	16	11.9560
$F_{Tenengrad}$	1.121	1.306	0.021	0.021	0.0429	0.0846	16	10.3519
$F_{Robert}$	0.290	0.472	0.015	0.020	0.0346	0.1279	16	4.6988
$F_{RbtEnergy}$	1.049	1.080	0.020	0.021	0.0388	0.0791	16	4.9650
$F_{Laplace}$	1.279	1.885	0.020	0.020	0.0134	0.0492	16	7.5527
$F_{SML}$	1.197	1.496	0.019	0.020	0.0160	0.0574	16	6.7289
$F_{Brenner}$	0.957	1.045	0.021	0.021	0.0426	0.0790	17	3.6615
$F_{Fourier}$	0.820	0.477	0.020	0.021	0.0868	0.1347	17	8.5183
$F_{DCT}$	1.196	0.765	0.018	0.018	0.0491	0.0866	15	8.5500
$F_{Variance}$	0.011	0.056	0.003	0.020	0.0437	0.2850	9	4.1126
$F_{Vollaths}$	0.356	0.442	0.012	0.017	0.1004	0.1030	18	4.0826

由表1列出由近及远的聚焦特征曲线，并且计算了前后离焦的函数评价指标，将该过程的指标左右置换，作为另一聚焦过程的函数的评价标准。

1) 由整体评价指标  $W$  可以看出，除了  $F_{Variance}$  函数的陡峭区宽度明显较小外，其他函数都相差无几。由图2的(a)、(b)、(c)可以分析出，无论是由远

及近,还是由近及远的聚焦过程,相比于该函数,其他函数都较早地进入陡峭区,这对自动聚焦系统快速寻找聚焦峰值是有利的。

自该过程聚焦起步,第一离焦阶段的函数评价指标为灵敏度  $F_L$ 、陡峭度  $S_L$  和平缓区波动量  $V_L$ 。

2) 灵敏度  $F_L$  较高的几个函数依次为  $F_{Laplace}$ 、 $F_{SML}$ 、 $F_{DCT}$ 、 $F_{Tenengrad}$  和  $F_{RbtEnergy}$ 。其他函数在该阶段的灵敏度较小,且相互之间相差较大,不适合接近特征曲线峰值处的精细搜寻。

3) 每个函数曲线之间都有显著差异,由图 2 可以看出,在由近及远的第一聚焦阶段  $F_{EOG}$ 、 $F_{Tenengrad}$  和  $F_{Brenner}$  的陡峭度  $S_L$  较大,说明在该阶段聚焦时,该 3 个聚焦函数对不同离焦程度图像的分辨能力是较强的。

4) 由表 1 和图 2 可以看出平缓区波动量  $V_L$  中  $F_{Vollaths}$  和  $F_{Fourier}$  的较大, $F_{SML}$  和  $F_{Laplace}$  的最小。该评价指标较低时说明当受辐射及其它噪声的影响,在由近及远的第一聚焦阶段,此函数的波动剧烈程度越小,则抗噪性能就越好。

5) 最后给出的是各函数的计算时间  $T$ 。在两个不同聚焦过程中可以看出  $F_{Brenner}$  的用时最短, $F_{Sobel}$  和  $F_{Tenengrad}$  所用时间都较长,这对于自动聚焦系统的工作效率是较为不利的。

考虑由远及近的聚焦过程,可将表 1 中的右侧指标、 $W$  和  $T$  作为该聚焦过程的第一离焦阶段的评价标准。可以看出:灵敏度  $F_R$  中  $F_{Laplace}$ 、 $F_{SML}$ 、 $F_{EOG}$ 、 $F_{Tenengrad}$ 、 $F_{RbtEnergy}$  和  $F_{Brenner}$  的都较高;很多函数曲线的右半部分比左半部分显得更为“陡峭”,除了  $F_{DCT}$  和  $F_{Vollaths}$ ,其他函数的陡峭度  $S_R$  相差无几;该过程的平缓区波动量  $V_R$  中  $F_{Variance}$  的最高,其次是  $F_{SMD}$ 、 $F_{Robert}$ 、 $F_{Sobel}$  和  $F_{Vollaths}$ 。

## 5 结论

相比于可见光自动聚焦设备,红外自动聚焦系统所用的聚焦函数的选取更为复杂。因为红外成像系统特殊的作用原理,其聚焦程度主要是由前端的光学透镜与红外探测器之间的位置所决定它接收的是进入探测器视场的一切辐射,所以本文的核心问题是用针对性的评价标准,对由近及远聚焦过程的 13 个函数曲线左右特征进行分析,选取适合两个相反方向的聚焦过程的最优函数。红外热成像系统进行由近及远的自动聚焦时,根据函数特征曲线的第一聚焦阶段的性

能,结合指标定量分析发现: $F_{Laplace}$  可作为该过程的最优函数;并且由图 2 的曲线右侧和表 1 的右侧指标可看出: $F_{Laplace}$  和  $F_{SML}$  可作为由远及近的聚焦过程的最优函数选取。

在实际应用中,自动聚焦系统的聚焦程度不仅取决于硬件标准,系统的程序控制也是重要因素。由于特殊的成像原理,红外自动成像系统的聚焦部分函数的选取,并不能像可见光设备那样整体分析。应根据不同的聚焦过程,具体分析聚焦过程特征,选取合适的最优函数。因此,本文所提的 5 个评价指标为两个聚焦过程的函数性能的评估及最优函数的选取提供了基本的理论依据。

## 参考文献:

- [1] 陈玉群,范典,胡俊,等. 红外透镜检测中的自动聚焦技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2120-2125.  
CHEN Yuqun, FAN Dian, HU Jun, et al. Auto-focus technology in the detection of infrared lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2120-2125.
- [2] 李众,郝争辉,王高,等. 热像仪聚焦程度对红外辐射检测的影响研究[J]. 红外技术, 2019, 41(3): 245-250.  
LI Zhong, HAO Zhanhui, WANG Gao, et al. The Influence of Degree of Thermal Imager Focusing on the Detection Accuracy of Infrared Radiation[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(3): 245-250.
- [3] 翟永平,周东翔,刘云辉,等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0418002-1-0418002-11.  
ZHAI Yongping, ZHOU Dongxiang, LIU Yunhui, et al. Design of Evaluation Index for Auto-Focusing Function and Optimal Function Selection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0418002-1-0418002-11.
- [4] 原育凯. 光学系统的自动调焦方法[J]. 红外, 2004(6): 15-21.  
YUAN Yukai. Auto-Focusing methods of optical system[J]. *Infrared*, 2004(6): 15-21.
- [5] Jarvis R A. Focus optimization criteria for computer image processing[J]. *Microscope*, 1976, 24(2): 163-180.
- [6] Tenenbaum J M. Accommodation in Computer Vision[D]. USA: Stanford University, 1970.
- [7] ZHANG X, Fukuda N, Obuchi Y, et al. A signal processing system on chip for digital cameras[C]//IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE, 2000: 1243-1248.
- [8] 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.  
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.