

文章编号: 0253-2239(2010)12-3495-06

基于图像功率谱的航空光电平台自动检焦设计

赵志彬^{1,2} 刘晶红¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 针对航空光电平台中可见光摄像机在高空由于温度、气压等环境参数的变化所引起的光学系统离焦现象,对基于图像功率谱的清晰度评价算法和检焦搜索算法进行了研究。分析了不同场景的航拍图像的功率谱具有一定的不变性。根据离焦会引起功率谱高频分量的损失,提出了两种对功率谱和对焦评价算子(PSS)的改进。针对航拍易受到环境干扰的问题,提出了变步长的全局搜索算法(FS)。使用 1 mm 的搜索步长,调焦误差为 0.3 mm,满足系统对误差的要求。所提出的两种基于图像功率谱的清晰度评价算法能够有效反映出实际航拍图像的离焦状态,并分别使对焦评价函数的饱和区特性和灵敏度得到改善。调焦实验的结果表明,小于镜头焦深的检焦步长才能保证检焦结果的正确。

关键词 成像系统;航空光电平台;自动调焦;图像功率谱;对焦评价函数;搜索策略

中图分类号 TP391;TN386.5 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103012.3495

Power Spectra-Based Auto-Focusing Method for Airborne Optoelectronic Platform

Zhao Zhibin^{1,2} Liu Jinghong¹

(¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to retrieve the defocus in the optical system of airborne camera caused by the changes of temperature, pressure and other environment parameters in high altitude, focus measure algorithm based on power spectra and auto-focus search strategy are represented. Firstly, it is introduced that the power spectra of images taken from different region has the characteristic of invariance. Two betterments over the power spectra sum (PSS) focus measure function are proposed based on the main attenuation of power spectra in the high frequency. Then, full search (FS) strategy using changed steps is proposed in order to reduce the focus error caused by noise from environment. The results show that the FS strategy can locate the optimal focus position accurately when using search step length of 1 mm. The focus error is 0.3 mm which fulfills the requirement of system. The PSS proposed algorithms can indicate the defocus state of images taken by airborne camera, and it can also improve the properfies of saturation region and sensitiveness of the focus measure curve respectively. Search steps shorter than focus-depth can guarantee the validity of the result.

Key words imaging system; airborne optoelectronic platform; auto-focusing; image power spectra; focus measure function; search strategy

收稿日期: 2010-03-29; 收到修改稿日期: 2010-06-06

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400105)资助课题。

作者简介: 赵志彬(1984—),男,硕士研究生,主要从事动基座光电成像设备电子设计方面的研究。

E-mail: zzbinbinzz@163.com

导师简介: 刘晶红(1967—),女,研究员,主要从事机载光电成像测量设备方面的研究。

E-mail: liu1577@126.com(通信联系人)

1 引 言

目前高性能的机载光电平台多以高空斜视、向远距离目标侦察为特点,为了对目标能够识别跟踪,可见光摄像机的焦距必须足够长。随之而来的问题是,长焦距相机由于环境条件(温度、大气压力)变化引起的镜头后截距变化较大,造成离焦现象,引起的分辨力急剧下降。实时精确的自动调焦技术在机载光电平台中非常关键。目前大多采用的方法是靠光学设计保证足够的焦深或采用光学补偿,但对光学设计、机械设计和光机加工要求很高^[1~3]。

随着计算机硬件和数字图像技术的飞速发展,图像的实时处理已经成为可能。基于图像处理的自动调焦方法直接根据获取的图像分析出图像清晰度,从而获得当前的成像状态,完成聚焦操作,它指示了自动聚焦技术的发展趋势。

目前,国内外很多学者针对不同的成像系统对自动调焦算法进行了大量的研究,提出了多种图像清晰度评价的方法。文献[4~9]对基于梯度的对焦评价函数、基于信息熵的对焦评价函数和基于自相关的清晰度评价函数等十几种清晰度评价函数进行了效果测试,结果表明基于索贝尔(Sobel)和拉普拉斯(Laplace)边缘检测算子的清晰度评价方法分别具有很好的稳定性和灵敏度。以上方法都是针对静止的成像目标,而机载成像设备在工作时处于和地面目标相对运动的状态,因此这些方法可能在机载成像设备的检焦中不能很好的应用。文献[10]从图像频域的角度,提出了基于图像功率谱的图像离焦程度判别方法。文献[11,12]提出直接将图像的功率谱求和作为清晰度评价依据的对焦评价方法。本文对不同离焦程度的航拍图像的功率谱进行了研究,根据离焦所引起的功率谱变化,提出了2种基于图像功率谱的对焦评价方法,并对其效果进行了实验。

2 基于图像功率谱的对焦评价函数

2.1 功率谱的不变性

图像的功率谱定义为



图1 相同的拍摄条件下的航拍照片

Fig. 1 Photos taken by aerial camera under the same condition

$$|\mathcal{F}(u,v)|^2 = \mathcal{F}(u,v) * \mathcal{F}^*(u,v), \quad (1)$$

式中 $\mathcal{F}(u,v)$ 为图像 $f(x,y)$ 的傅里叶变换。功率谱是图像的重要特征,它的大小反映了图像各个空间频率的强度。其中心位置代表图像的低频分量,边缘位置代表图像的高频分量。图像的离焦往往导致高频分量的损失。

当把二维的图像功率谱数据绘制成三维空间的一个曲面进行比较时,不易看出图像功率谱之间的差异。为方便不同图像的功率谱的比较,将图像的二维功率谱转换成一维的功率谱为

$$P(\rho) = \frac{1}{n_p \eta^2 N^2} \sum_{\theta=-180^\circ}^{\theta=+180^\circ} |\mathcal{F}(\rho,\theta)|^2, \quad (2)$$

式中 $\mathcal{F}(\rho,\theta)$ 为 $\mathcal{F}(u,v)$ 的极坐标表示形式; $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$,为一维功率谱的频率值; n_p 为半径大小为 ρ 的坐标点个数; $\eta^2 = |\mathcal{F}(0,0)|^2 / N^4$,为图像灰度的平均值的平方; N^2 为图像总的像素数;为了消除图像平均亮度和大小不同所引起的不同图像功率谱之间的差异,将图像的功率谱除以 η^2 和 N^2 。

在过去二十多年对功率谱的研究中发现,不同的景物用功率谱的方法在空间频域进行分析时表明,大多数的任意景物都有大致相同的功率谱。自然图像的功率谱幅值 $p(f)$ 变化遵循规律^[10]

$$P(f) = A/f^k, \quad (3)$$

式中 f 指空间频率; A 为图像对比度常量; k 为指数变量。目前这一模型广泛应用于视觉识别与处理中。很多研究人员使用不同的图像库对 k 值进行的研究表明,不同的图像库所得到的 k 值在 1.81 ~ 2.05 之间^[10]。在构建图像功率谱模型时,设置 $k = 2$ 。随着空间频率的增加,不同图像的一维功率谱大致以 A/f^2 的趋势衰减,这一特征也被称为图像功率谱的不变性。

为了验证图像功率谱的不变性,选取4幅在相同的拍摄条件下所拍摄的不同内容的航拍图片,如图1所示。根据(2)式分别计算4幅图像的一维功率谱曲线,如图2所示。可以看出,对于同一成像系统所拍摄的四幅图片,尽管内容各不相同,它们的一

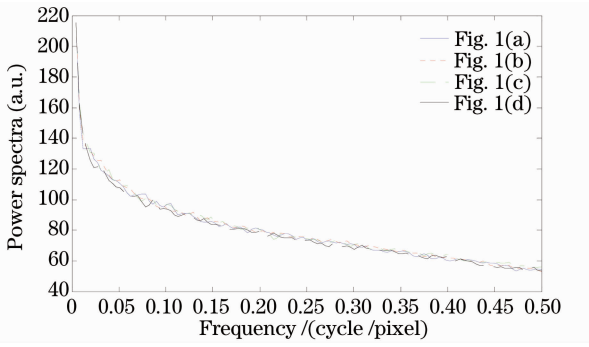


图 2 航拍照片的一维功率谱

Fig. 2 1D power spectra of the air photos

维功率谱曲线具有相同的走向,由于计算功率谱时进行了大小和亮度的归一化处理,它们的一维功率谱只有极其细微的差别。

2.2 离焦引起的功率谱变化

成像系统的数学模型为

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y), \quad (4)$$

式中 $g(x, y)$ 为光学系统输出图像, $f(x, y)$ 为输入图像, $h(x, y)$ 为成像系统的系统传递函数。有两幅不同内容的输入图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 。它们的一维功率谱分别为 $P_{f_1}(\rho)$ 和 $P_{f_2}(\rho)$ 。根据(2)式, 输出图像 $g_1(x, y)$ 和 $g_2(x, y)$ 的一维功率谱 $P_{g_1(g_2)}(\rho)$ 分别为

$$P_{g_1(g_2)}(\rho) = \frac{1}{n_p \eta^2 N^2} \int_{\theta=-180^\circ}^{\theta=+180^\circ} T\{\mathcal{F}_d[f_{1(2)}(x, y) \otimes h(x, y)] * \mathcal{F}_d[f_{1(2)}(x, y) \otimes h(x, y)]^*\} d\theta =$$

$$\frac{1}{n_p \eta^2 N^2} \int_{\theta=-180^\circ}^{\theta=+180^\circ} T[|\mathcal{F}_{1(2)}(u, v)|^2] d\theta * \int_{\theta=-180^\circ}^{\theta=+180^\circ} T[|H(u, v)|^2] d\theta = P_{f_1(f_2)}(\rho) * \int_{\theta=-180^\circ}^{\theta=+180^\circ} T[|H(u, v)|^2] d\theta, \quad (5)$$

式中 $\mathcal{F}_d[\cdot]$ 表示图像的离散傅里叶变换运算, $T[\cdot]$ 表示直角坐标到极坐标的转换运算。对于同一成像系统在同样的拍摄条件下, $h(x, y)$ 保持不变, 由于 $P_{f_1}(\rho) \approx P_{f_2}(\rho)$, 所以 $P_{g_1}(\rho) \approx P_{g_2}(\rho)$ 。也就是说同一成像系统, 同样的拍摄条件, 所引起的图像功率谱的变化是相同的。如图 3 和图 4 所示, 图 3(a1), (a2) 和 (b1), (b2) 各为一组不同离焦程度的航拍图

片, 其中 (a1), (a2) 离焦程度相同, (b1), (b2) 离焦程度相同。图 4 是两组图片的一维功率谱曲线。可以看出, 虽然两组图片在空间域上内容不同, 随着离焦程度的变化, 两组图像的功率谱的变化是大致相同。这就为航空摄像机在飞机飞行状态下的自动检调焦找到了依据。



图 3 两组不同离焦程度的航拍图片

Fig. 3 Two groups of aerial photos under different defocus conditions

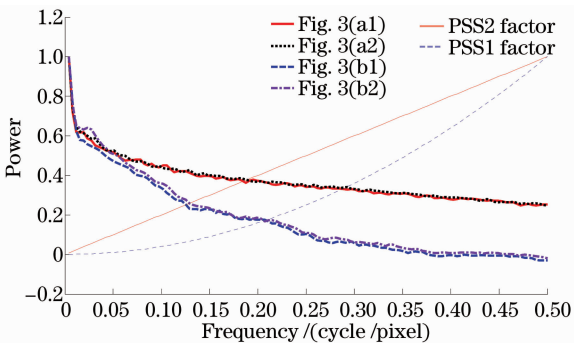


图 4 图 3 中航拍图片的一维功率谱

Fig. 4 1D power spectra of the aerial photos in fig. 3

2.3 基于功率谱的对焦评价函数

光学成像系统的离焦会引起图像空间域上的纹理结构变模糊, 对应于频率域的高频分量的丢失。从图 4 可以看出, 离焦越严重, 图像的一维功率谱的高频部分下降的越严重。因此, 可以根据图像功率谱来构造清晰度评价函数。文献[12]提出一种简单的办法, 就是将功率谱的所有频率分量直接相加, 得到功率谱和(PSS)清晰度评价算子

$$Q_{\text{PSS}} = \sum_{u=-M/2}^{M/2} \sum_{v=-N/2}^{N/2} \sqrt{P(u, v)}, \quad (6)$$

在 PSS 算子中, 离焦图像的功率谱中高频分量

的损失会导致求和得到的 PSS 值变小。图像离焦越严重,其功率谱高频分量损失也越严重,PSS 值也就越小,因此,PSS 值可以反映出图像离焦的状态。

从图 4 中可以看出图像离焦会引起功率谱高频部分的损失,而对低频部分并没有太大的影响。如果对功率谱的低频部分采用小权值加权,而对功率谱的高频部分用大权值加权,就会更加突出高频部分对对焦评价的影响。PSS 值对图像离焦状态的反映会变的更加灵敏。选择功率谱的空间频率 ρ 的一次函数和二次函数作为加权因子对图像功率谱的各个分量进行加权,两个加权因子分别是 $W_{PSS1} = \rho^2$ 和 $W_{PSS2} = n_\rho = 2\pi\rho$,其中 W_{PSS2} 表示空间频率为 ρ 的功率谱点的个数。从图 4 中可以看出 W_{PSS1} 和 W_{PSS2} 因子都具有低频部分小权值,高频部分大权值的特点,只是两个加权因子的增长趋势不同,对高频部分的提升效果也不同,最终得到的对焦评价曲线也会有不同的走势。两种使用不同加权因子的清晰度评价函数为

$$Q_{PSS1} = \sum_{u=-M/2}^{M/2} \sum_{v=-N/2}^{N/2} \sqrt{P(u,v)} * \rho^2, \quad (7)$$

$$Q_{PSS2} = \sum_{u=-M/2}^{M/2} \sum_{v=-N/2}^{N/2} \sqrt{P(u,v)} * n_\rho. \quad (8)$$

为了对以上三种清晰度评价算子的实际应用效果进行评估,从先前试飞的光电平台所记录的视频中,选取一组在手动调节焦距由近到远过程中的图像帧序列,共有 40 frame,其中第 20 帧为人眼评判的最清晰图像,其它图像随着焦距的变化逐渐模糊。分别用三种 PSS 算子计算它们的清晰度,得到各自的清晰度评价曲线,如图 5 所示。可以看出,PSS2 算子的曲线和 PSS 的相比,具有更好的尖锐程度,这是由于 PSS2 因子的加入使得图像功率谱高频部分的变化能够更加灵敏地反映到清晰度评价的变化上,使得对焦评价函数的灵敏度得到提高。不足之处是 PSS2 曲线的饱和区范围比较大,不利于峰值区域的确定。根据其特点,PSS2 算子适用于精搜索阶段的精确搜索。PSS1 算子的曲线和 PSS 的相比,使得曲线的饱和区特征得到改善,PSS1 算子的曲线具有更宽的峰值区域,从 PSS1 因子的走势来看,对高频部分的提升没有 PSS2 因子强,在很好的抑制低频的同时,中间很大一部分对离焦反映比较灵敏的频率分量也得到了抑制,这就导致 PSS2 算子的对焦评价曲线变的平缓。小的饱和区,有利于调焦初期的搜索方向定位,适合于搜索算法的粗搜索阶段。综上所述,这里提出的对 PSS 算子的两种

改进,分别使对焦评价曲线的灵敏度和饱和区得到了改善。

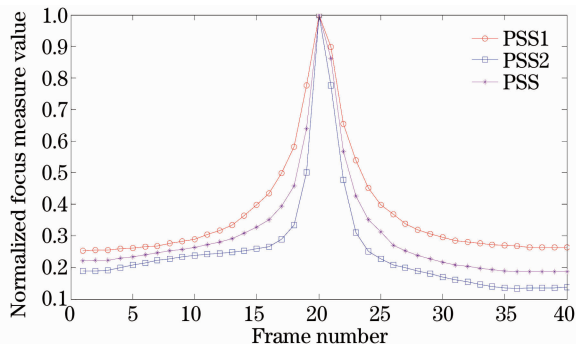


图 5 PSS,PSS1,PSS2 算子的对焦评价曲线

Fig. 5 Focus measure curve of PSS,PSS1 and PSS2

3 调焦搜索算法

除了对焦评价函数的选择,对焦深度法(DFP)面临的第二个问题就是如何从一系列图像的对焦评价中找出最优的聚焦位置即调焦搜索策略的选择。目前存在以下几种搜索策略^[13~15]: 1) Fibonacci 搜索法;2)爬山搜索算法;3)基于曲线拟合的方法;4)尺度搜索算法(RS);5)全局搜索法。

光电平台在空中作业时的情况比地面试验要复杂得多,极易受到大气湍流,像移模糊和机械振动等干扰的影响,其对焦评价曲线会产生畸变和局部峰值。爬山法,Fibonacci 算法和 RS 算法搜索过程比较复杂,容易进入搜索误区,得到错误的检焦位置,稳定性差。而全局搜索算法在整个焦距范围内采用拉网式搜索,能够最大限度地保证结果的准确性,具有很高的稳定性。光电平台检焦是在每次拍摄前进行的,对搜索算法的稳定性要求很高,对实时性的要求不高,因此选择稳定性高的全局搜索算法作为搜索策略。

为了降低检焦的时间,结合 PSS1 算子对焦评价曲线饱和区小和 PSS2 算子对焦评价曲线灵敏度高的特点对全局搜索算法(FS)进行了改进。首先,在粗搜索阶段用 PSS1 算子计算图像清晰度,使用大步长移动调焦镜头组,得到粗聚焦位置;然后,在粗聚焦位置附近改用 PSS2 算子计算清晰度和小步长搜索得到精确的聚焦位置。搜索算法中的大步长和小步长是由对焦评价函数和光学镜头的参数所确定的。其中大步长必须小于对焦评价曲线的峰值宽度才能保证搜索时不会跳过峰值区域;小步长必须小于镜头焦深才能保证在焦深范围内至少有一个采样点。和原来的全局搜索法相比,通过控制粗搜索

和精搜索阶段的搜索步长,可以在调焦精度和时间之间取得更好的平衡。

4 实验与结果

使用 UNIQ 的彩色数字 CCD 摄像机 UC-1830CL 和焦距为 5.8~69.6 mm 的 Raymax 镜头进行了地面实验。将航拍照片贴在标靶上作为拍摄目标。将标靶设置在可以左右水平移动的导轨上,模拟航拍时飞机和地面的相对运动。设计了基于 DM642+FPGA 的自动检焦控制板,完成清晰度评价值的计算和自动检焦搜索算法。

1) 将标靶固定在距相机 5 m 的位置,在整个可调的焦距范围(5.8~69.6 mm)内以 1 mm 为步逐一采集样点图像,计算 PSS2 值,得到 PSS2 算子的对焦评价曲线,如图 6 所示。评价曲线的峰值点位于 26.8 mm 的焦距位置,即 5 m 的像距所对应的最佳焦距为 26.8 mm。从图中可以看出 PSS2 算子的对焦评价曲线的峰值区域宽度大概为 20 mm。由于实际飞行时对焦评价曲线可能会由于干扰产生局部峰值,为确保稳定性,在粗搜索阶段使用 9 mm 的搜索步长。2) 将镜头起始位置设 55 mm 的位置,在粗搜索阶段使用 9 mm 的搜索步长,在精搜索阶段分别使用 1, 3, 5, 7 mm 的步长,对左右移动的标

靶进行调焦实验,记录最终的检焦结果和检焦时间,得到的数据如表 1 所示。不同步长的检焦结果如图 7 所示。

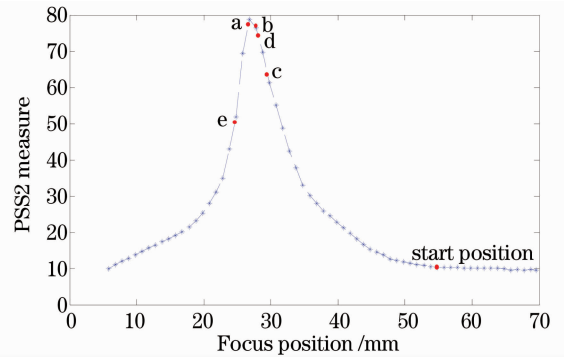


图 6 PSS2 算子的调焦评价曲线

Fig. 6 Focus measure curve of PSS2 operator

表 1 不同搜索步长的检焦误差和检焦时间

Table 1 Focus error and focus time of different search steps

Step length of fine search /mm	Focus time /s	Final focus position /mm	Focus error /mm
1	13.2	26.5	0.3
3	5	27.3	0.5
5	3	29.6	2.8
7	2.1	28.1	1.3
9	1.5	24.7	2.1



图 7 不同搜索步长的检焦结果

Fig. 7 Final image of different search steps

最终的检焦结果允许的误差为光学镜头的半倍焦深,镜头焦深计算如下式所示:

$$\delta = \pm 2F^2\lambda, \quad (9)$$

式中 δ 为镜头的半倍焦深; F 为镜头的光圈系数; λ 为成像光谱的波长。根据光学镜头为 $F=1.6\sim 360$ 的自动光圈镜头,结合实际测试,取 F 数为 22。 λ 取可见光谱的中心波长 $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ 。计算得到半倍焦深 $\delta=0.532 \text{ mm}$ 。从表 1 的数据来看, 1 mm 和 3 mm 的搜索步长的检焦误差小于半倍焦深,可以得到比较清晰的检焦图像如图 7 所示。根据第 3 节讨论的小步长选取原则,小于焦深的调焦步长能够保证在最佳聚焦位置为中心的焦深范围内至少有一个采样步点。实验所使用的镜头焦深为 1.064 mm。因此在精搜索阶段使用 1 mm 的搜索

步长才能保证检焦的误差在允许的误差范围内。3 mm 的搜索步长的检焦误差之所以也能够小于半倍焦深是因为 3 mm 的搜索步长恰好在最佳成像位置的焦深范围内有采样点,具有偶然性,因此 3 mm 的步长不能够在实际检焦中使用。5, 7 和 9 mm 的搜索步长远大于镜头焦深,搜索过程中会跨越最佳成像位置的焦深范围,因此最终检焦误差不能达到要求。

5 结 论

针对航空光电平台中可见光摄像机在飞机飞行状态下的自动检焦问题,对自然图像功率谱的不变性和离焦所引起的功率谱损失进行了研究,提出了两种功率谱加权求和的图像清晰度评价算子。通过

实际航拍视频序列的测试,发现两种改进后的功率谱求和算子都能够很好地反映出图像离焦的状态,其中 PSS1 算子可以改善对焦评价曲线的饱和区特征,PSS2 算子可以改善对焦评价曲线的灵敏度。接着,针对在光电平台实际航拍过程中容易受到干扰而导致对焦评价曲线的不稳定问题,提出了可以最大限度保证稳定性且兼顾效率的变步长搜索策略。通过地面试验的测试,发现 1 mm 的搜索步长的检焦误差为 0.3 mm,满足系统对检焦误差的要求,验证了精搜索步长必须小于镜头焦深的步长选取原则。本文所设计的航空摄像机自动检调焦方法将于不久进行飞行测试。

参 考 文 献

- Hui Shouwen. Compensation for long focus oblique real-time aerial camera being out of focus[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(2): 162~165
惠守文. 长焦距斜视实时航空相机离焦补偿[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(2): 162~165
- Shi Lei, Jin Guang, Tian Haiying *et al.*. Auto-focusing method with automatic calibration for aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2460~2464
史磊,金光,田海英等. 航空相机的自准直自动检焦方法研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2460~2464
- Zhou Jiufei, Zhai Linpei, Zhou Gang *et al.*. Auto-focus method of aerial imaging device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 105~108
周九飞,翟林培,周刚等. 航空成像设备自动调焦方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 105~108
- Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in auto-focusing criterion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 35~39
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
- Zhao Hui, Bao Getang, Tao Wei. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(5): 531~536
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): 531~536
- Cai Mingrong, Ma Junshan, Wang Fuhong. Research on the discrimination methods of the image definition in the auto-focusing system[J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(5): 35~39
蔡明荣,马军山,王福红. 自动调焦系统中图像清晰度判别方法的研究[J]. *光学仪器*, 2008, **30**(5): 35~39
- Liang Minghua, Wu Zhiyong, Chen Tao. Auto-focusing adjustment of theodolites by largest the gradient method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(12): 3016~3020
梁敏华,吴志勇,陈涛. 采用最大灰度梯度法实现经纬仪自动调焦控制[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(12): 3016~3020
- 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定[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 172~176
- 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): 1703~1709
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): 1703~1709
- Xiu Jihong. Aerial Image Quality Evaluation Based on Power Spectra [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2005. 26~33
修吉宏. 基于功率谱的航空图像质量判别技术研究[D]. 北京: 中国科学院, 2005. 26~33
- Sun Weidong, Ding Xiancheng. Research on focus measure function of airborne optoelectronic system[J]. *Electronics Optics & Control*, 1998, **5**(3): 33~39
孙卫东,丁贤澄. 机载光电成像系统的像清晰度函数的研究[J]. *光电与控制*, 1998, **5**(3): 33~39
- Wang Haixia, Wang Xin, Xu Shuyan *et al.*. Application of image power spectra in the refocusing of high-resolution remote sensing camera[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(8): 464~467
王海霞,王昕,徐抒岩等. 功率谱在高分辨率遥感相机检调焦中的应用[J]. *光学技术*, 2006, **32**(8): 464~467
- Hu Tao, Chen Shizhe, Liu Guodong *et al.*. Algorithm of rapid auto-focusing with a long-range[J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2006, **17**(4): 464~467
胡涛,陈世哲,刘国栋等. 大范围自动调焦快速搜索算法[J]. *光子·激光*, 2006, **17**(4): 464~467
- Gong Guangyong, He Wenzhong, Gao Xuhui. Optimized mountain climb-searching of auto-focusing in infrared imaging system[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(11): 1213~1215
宫光勇,何文忠,高旭辉. 红外系统中自动调焦爬山搜索算法的优化设计[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(11): 1213~1215
- Yi Yao, B. Abidi, M. Abidi. Digital imaging with extreme zoom: system design and image restoration[C]. IEEE Conf. on Computer Vision Systems, 2006. 52~58