

信噪比对航空相机调焦精度的影响

孟繁浩^{1,2,3} 丁亚林^{1,3} 王德江^{1,3*} 修吉宏^{1,3}

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中科院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033
² 中国科学院大学, 北京 100049
³ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 图像法进行航空相机调焦过程中, 图像噪声的影响会使得调焦精度降低, 然而对于图像信噪比和调焦精度两者之间关系的研究主要是基于实验结果和主观判断, 没有通用性的理论和确切的结论。从理论上分析并给出两者之间确切的关系表达式, 并通过实验验证了调焦精度和图像信噪比之间呈正相关的关系, 图像的信噪比越高, 调焦精度越高。以评价函数的方差值作为衡量调焦精度的标准, 理论上计算了图像的信噪比对评价函数的期望和方差的影响, 提出信噪比越高的图像中噪声越少, 评价函数的方差值越小, 调焦越准确。设计实验记录不同信噪比下, 应用同样的调焦方法, 得到的图像评价函数方差的变化规律, 实验结果显示当图像的信噪比由 27 dB 升高到 39 dB 时, 评价函数方差由 0.262 降低为 0.0611, 相当于调焦精度提高了约 30%, 证明了理论分析的正确性。

关键词 成像系统; 调焦精度; 信噪比; 评价函数; 方差值

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0911001

Analysis Influence of Signal to Noise Ratio on Auto-Focusing Precision of Aerial Camera

Meng Fanhao^{1,2,3} Ding Yalin^{1,3} Wang Dejiang^{1,3} Xiu Jihong^{1,3}

¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In the use of auto-focusing technology based on image processing of aerial camera, the precision decreases due to the influence of image's noise. Currently the relationship between signal to noise ratio (SNR) of image and auto-focus precision is mainly based on the experimental results and subjective judgments, but there is no universal theory and exact conclusion on them. The relationship and an exact mathematical expression are analyzed and given between the SNR and auto-focus precision, experiments show that the SNR of image has a positive correlation to auto-focus precision, the higher SNR of the image, the higher precision of the auto-focus precision. Through the standard of the expectation and variance of focus measure, the influence of SNR on precision is analyzed, and results show that the influence of noise can be weakened by calculating the focus measure more times. Experiments are designed and the changes of SNR with variance of focus measures are recorded by applying the same focus method in different conditions. Results show that when the SNR of image rises from 27 dB to 39 dB, the variance of focus measure function decreases from 0.262 to 0.0611, meaning that auto-focusing accuracy is improved by about 30%. The result proves the correctness of the theoretically analysis.

Key words imaging systems; focusing precision; signal to noise ratio; focus measures; variance

OCIS codes 110.2970; 030.4280; 100.2960; 120.0280; 280.4788

收稿日期: 2014-03-20; 收到修改稿日期: 2014-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(61308099)

作者简介: 孟繁浩(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事航空相机图像调焦方面的研究。E-mail: mengfanhao1234@gmail.com

导师简介: 丁亚林(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空相机总体设计方面的研究。

E-mail: dingyl_1964@126.com

* 通信联系人。E-mail: wangdj04@ciomp.ac.cn

1 引 言

目前,长焦距航空相机多以高空斜视、远距离成像为特点,航拍高度达到数千米。长焦距航空相机由于航空环境中温度^[1]、大气压力等变化导致镜头各表面热膨胀系数和空气折射率发生变化而引起离焦现象^[2-3]。为了使航空相机获得高清晰度的图像,需要在航空相机中设置检调焦系统,利用检调焦组件反馈回的准确离焦信息对相机进行调焦,使成像元件的感光面重新回到光学系统焦平面。因此,实时精确的自动检调焦技术在现代航空摄影中十分关键。

目前,航空遥感相机检调焦的方法主要包括:自准直自动检焦方法^[4-5]、基于传感器的标定方法^[6]和基于图像处理的检调焦方法^[7-12]。自准直自动检焦方法通过航空相机上安装的光电自准直检焦机构检测相机拍摄前的系统焦面位置,以消除大气压力和温度的影响。因其需要额外的调焦装置,因此增加了航空相机的体积和重量,同时也降低了系统可靠性,增加了系统的成本^[13],而且存在调焦时间长的不足。基于传感器的标定方法根据相机调焦系统实时采集的温度、大气压力和成像距离,计算系统的离焦量并控制调焦。该方法需要在模拟环境下标定离焦量与温度、大气压力和成像距离的关系,虽然调焦速度快,但调焦属于开环控制,标定的工作量大,精度不高。基于图像处理的检调焦方法根据航空相机拍摄的目标景物图像,应用图像处理技术检测相机的离焦量并实现自动调焦功能。由于直接利用航空相机拍摄的图像,不需要额外的检焦装置,具有结构简单,成本低廉,调焦精度高等优点,因此基于图像处理的检调焦方法成为近年来航空相机自动调焦技术的发展方向。

航空遥感相机应用基于图像处理的检调焦方法时,采用面阵、高帧频成像模式,图像相邻帧之间有较多的重叠区域,应用拍摄到的一系列景物图像中的重叠部分,通过计算图像的评价函数曲线进行调焦。由于航空相机的对地成像的距离较远,相机成像容易受到振动和飞行器姿态变化的影响产生像移;航空相机的视场大,收容范围广,相机拍摄属于广域成像,视场中不同景物的边缘细节和光照度差别较大。这些因素使相机探测器上接收到的图像出

现模糊或图像细节较少,图像的信噪比降低。图像信噪比的高低对航空相机图像调焦方法有着重要影响。对信噪比较低的图像(如沙漠、海洋等细节单一的图像或因振动而模糊的图像)应用基于图像处理的调焦法时,调焦系统会出现调焦错误,有时甚至会失效。

目前相关文献中提到的信噪比和图像调焦之间的关系都是基于实验结论和主观判断的结合,缺少理论上的研究。本文提出了一种图像信噪比对调焦精度影响的理论分析,通过分析评价函数方差值与图像信噪比的关系,说明了图像信噪比对调焦精度的影响。该理论在图像调焦领域中具有重要意义。

2 噪声对调焦评价函数模型影响分析

2.1 图像调焦评价函数模型分析

图像评价函数是用来判断图像是否清晰的依据。一般认为,一幅聚焦良好的图像具有更清晰的边缘和细节^[14-15]。因此,提取图像中的边缘和细节部分作为评价一幅图像是否清晰的依据。目前文献中提出的评价函数多种多样,但大多数评价函数的建立都基于相似的模型^[16],即先对图像的亮度进行归一化,消除不同图像之间由于亮度不同而造成的差异;然后用评价函数算子与图像作卷积运算,评价函数算子起到放大或提取图像的细节或高频分量的作用;统计图像中用于判断图像清晰度信息的边缘细节或高频分量,计算变换后的图像的能量值,这个能量值就是这幅图像的评价函数。

假设一幅 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 大小的图像用 $f(x, y)$ 表示,评价函数算子表示为 $a(i, j)$,评价函数用 F_M 表示,则评价函数的模型可以用(1)式表示:

$$F_M = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [a(i, j) * f(x, y)]^2, \quad (1)$$

(1)式建立的评价函数模型适用于目前存在的多种评价函数,以下面4个常用的评价函数为例说明建立的评价函数模型的通用性。

2.1.1 梯度向量平方函数

梯度向量平方函数^[17]提取图像中的水平梯度和垂直梯度信息作为图像调焦的评价函数,评价函数表示为

$$F_M = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \{ [f(x+1, y) - f(x, y)]^2 + [f(x, y+1) - f(x, y)]^2 \}. \quad (2)$$

水平方向和垂直方向的评价函数算子分别为 $a_x(i, j) = [-1, 1]$, $a_y(i, j) = [-1, 1]^T$ 。

2.1.2 Laplace 梯度评价函数

拉普拉斯梯度评价函数^[18]计算公式为

$$F_M = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [4f(x,y) - f(x-1,y) - f(x,y-1) - f(x+1,y) - f(x,y+1)]^2. \quad (3)$$

由评价函数公式可以看出,评价函数算子为

$$a(i,j) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

2.1.3 功率谱评价函数

赵志彬等^[19]提出将图像的功率谱和作为图像的清晰度评价函数,功率谱的计算公式为

$$F_M = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [\mathcal{F}(u,v) * f(x,y)]^2. \quad (4)$$

图像的评价函数算子为傅里叶变换: $a(i,j) = \mathcal{F}(u,v)$ 。

2.1.4 小波变换评价函数

小波变换是一种多尺度信号分析方法,具有良好的时频局部化特征,在时间和频率上具有变化的分辨率。小波变换与傅里叶变换相似,都是将图像信号由时域变换到频域。利用图像小波分解后图像频谱中的频率信息值作为图像的调焦评价函数,计算公式为

$$F_M = \frac{1}{M \times N} \sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N [\psi(u,v) * f(x,y)]^2. \quad (5)$$

图像的评价函数算子为小波基函数变换: $a(i,j) = \psi(u,v)$ 。

2.2 噪声对评价函数影响的分析

航空相机对地面景物成像,假设拍摄图像的大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 。由于存在噪声,实际的图像应该是没有噪声时的理想图像信号 $f(x,y)$ 和噪声信号 $n(x,y)$ 的线性叠加^[20],这里分析的噪声为相机在成像过程中所产生的随机噪声,噪声的总体平均值为0。实际的图像信号表示为

$$f_n(x,y) = f(x,y) + n(x,y), \quad (6)$$

将图像信号代入到(1)式建立的评价函数模型中,计算得到图像的评价函数值为

$$F_M = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \{a(i,j) * [f(x,y) + n(x,y)]\}^2, \quad (7)$$

根据卷积的性质,卷积操作可以用滑动平均值操作简化。假设评价函数算子 $a(i,j)$ 的大小为 $m \text{ pixel} \times n \text{ pixel}$,则卷积操作简化为

$$a(i,j) * f(x,y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a(i,j) f(x+i,y+j), \quad (8)$$

把简化的卷积公式应用到图像的评价函数中,图像的评价函数表示为

$$F_M = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N F^2(x,y) + \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N N^2(x,y) + \frac{2}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N F(x,y)N(x,y). \quad (9)$$

式中 $F(x,y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a(i,j) f(x+i,y+j)$, $N(x,y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a(i,j) n(x+i,y+j)$ 。

根据评价函数的(9)式可以看出,公式第一项为在不存在噪声的理想情况下计算得到的图像评价函数值,第二、三项与噪声和图像信号有关。当图像的噪声远小于理想图像信号时,评价函数受到噪声的影响较小,评价函数曲线在理想评价函数曲线附近作小幅波动,如图1所示。

3 图像信噪比对调焦精度的影响分析

图像的信噪比是衡量图像质量的一项重要指标,图像的信噪比(用 R_{SN} 表示)为图像的信号与噪声的功率谱之比:

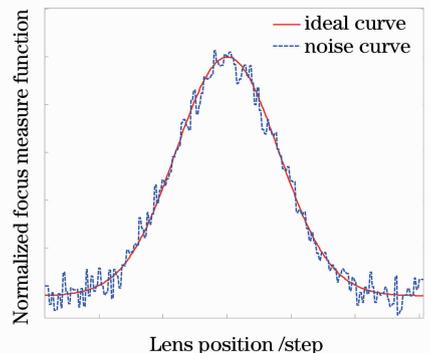


图1 噪声对评价函数的影响

Fig. 1 Effect of the noise to focus measures

$$R_{SN} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f^2(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N n^2(x, y)}. \quad (10)$$

为了分析图像信噪比对调焦精度的影响,引入

$$E\{F_M\} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N E\{F^2(x, y)\} + \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N E\{N^2(x, y)\} + \frac{2}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N F(x, y) E\{N(x, y)\} = F_{Msignal} + A_n \sigma_n^2, \quad (11)$$

式中 $F_{Msignal} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N F^2(x, y)$ 为理想图像信号的评价函数值, $A_n = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a^2(i, j)$ 是与评价函数算子有关的常数, σ_n 表示图像上不同点产生的随机噪声的均方差值, σ_n 可以通过简单的方法估计得到: 相机对亮度均匀的平面物体成像, 计算采集图像上所有像素点的方差值, 即为 σ_n 的估计值。

评价函数的期望值表示在有噪声的情况下, 多次计算评价函数时其平均值的大小。根据评价函数的期望值(11)式可知, 评价函数的期望值由两部分组成: 1) 理想图像信号的评价函数值, 只与图像信息有关; 2) 只与系统噪声相关的项。根据图像信噪比的定义可知, 评价函数的期望值与图像的信噪比相关。当航空相机对景物自动对焦时, 噪声对评价函数的影响只是在理想图像评价函数值上增加了一个常数, 而不改变评价函数曲线的形状和峰值位置, 如图 2 所示。因此, 通过多次对同一景物自动对焦可以得到准确的最佳对焦位置, 从而减弱噪声对图像调焦的影响。对于相同的图像信号, 信噪比越大表示图像中的噪声越少, 计算得出的评价函数的期望

数学上的期望和方差的概念。通过计算评价函数的期望与方差来评价图像信噪比对调焦精度的影响。根据(9)式计算评价函数的期望值:

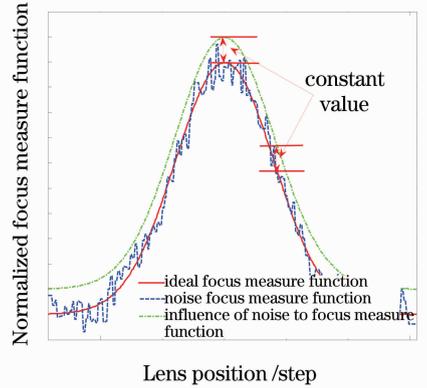


图 2 期望值对评级函数的影响

Fig. 2 Effect of expectation to focus measure function value越接近于真实值。

数学上, 方差值表示变量与其均值之间的偏离程度。评价函数的方差值越大, 表明评价函数的计算值偏离真实值的程度越大。反之, 方差值越小, 计算值越接近于真实值。通过计算评价函数的方差可以知道图像信噪比对评价函数的影响。方差的计算公式为

$$Var\{F_M\} = E\{F_M^2\} - (E\{F_M\})^2, \quad (12)$$

把评价函数值代入(12)式中, 计算并化简得到:

$$Var\{F_M\} = Var\left\{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N E\{N^2(x, y)\}\right\} + \frac{4}{(M \times N)^2} \sum_{x_1, y_1, x_2, y_2} F(x_1, y_1) F(x_2, y_2) \times E\{N(x_1, y_1) N(x_2, y_2)\} = Var\left\{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N E\{N^2(x, y)\}\right\} + \frac{4\sigma_n^2}{M \times N} \sum_{m=1}^{M+m} \sum_{n=1}^{N+n} F'^2(m, n), \quad (13)$$

式中 $F'(m, n) = [a(i, j) * a(-i, -j)] * f(x, y)$ 。

由(13)式可以看出, 评价函数的方差值由两部分组成, 一部分只与图像噪声有关, 另一部分只与图像信息有关, 则评价函数的方差值与图像的信噪比相关。根据方差的数学意义, 当航空相机自动对焦时, 评价函数的方差值越小, 表明评价函数曲线上最

大值位置越接近最佳对焦位置。对于归一化的评价函数, 信噪比越高的图像中噪声越少, 根据(13)式可知, 评价函数的方差值越小, 调焦越准确; 反之, 信噪比越低的图像评价函数的方差值越大, 自动调焦准确率越低, 如图 3 所示。

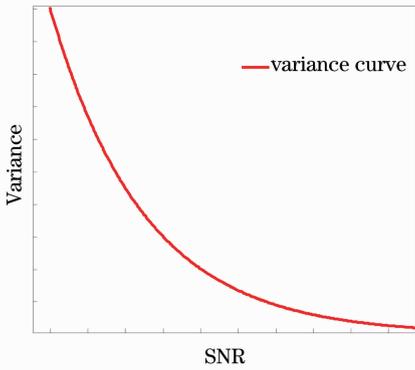


图 3 信噪比和方差值的关系

Fig. 3 Relation of R_{SN} with variance

4 实验与结果

为验证信噪比对调焦精度影响分析的正确性，

设计如图 4 所示验证试验。互补金属化合物半导体 (CMOS) 相机通过镜头对平行光管内的靶标成像，镜头固定在步进移动导轨上，利用步进电机控制相机镜头前后移动实现调焦过程。初始位置时，相机处于离焦状态，移动镜头使相机逐步合焦，当越过最佳对焦位置时，相机再次离焦。步进电机每移动一步相机采集一幅图像，利用图像小波变换后频谱中的高频分量信息^[20-21]作为调焦评价函数，画出评价函数与位置关系曲线图。通过调整靶标的亮度改变图像的信噪比，分别计算不同信噪比时图像的自动对焦准确性。实验装置如图 5 所示，其中 CI Systems 是包括靶标、积分球和平行光管的系统检测设备。

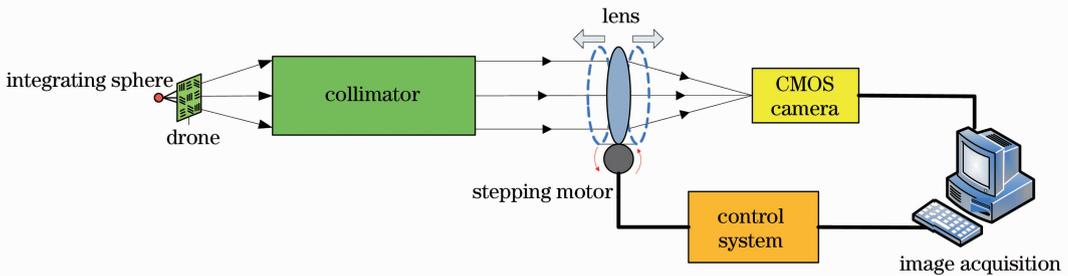


图 4 图像调焦系统原理框图

Fig. 4 Sketch of experimental setup

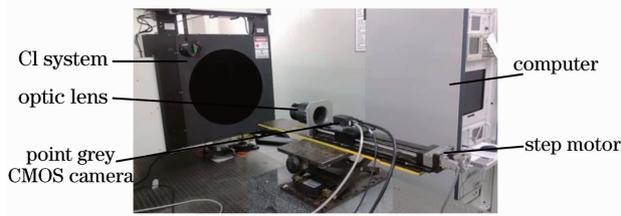


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

不同亮度的 4 组靶标图像如图 6 所示，四组图像的光照度分别为 2200、16000、30000、48000 lux。分别计算 4 组靶标图像的平均灰度值和图像的信噪比，如表 1 所示。由表中数据可以看出，图像的信噪比随着光照度的增加先升高后降低。

表 1 图像的光照度与信噪比关系表

Table 1 Relationship between illuminance and R_{SN}

Illuminance /lux	Mean gray value (8 bit)	R_{SN} /dB
2200	39.8	27
16000	67.8	33
30000	129.2	39
48000	195.3	34

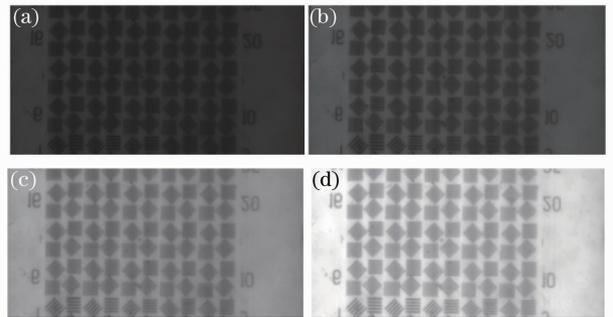


图 6 不同光照度时相机采集的图像。(a) 2200 lux；
(b) 16000 lux；(c) 30000 lux；(d) 48000 lux

Fig. 6 Collected images of different illuminations. (a) 2200 lux; (b) 16000 lux; (c) 30000 lux; (d) 48000 lux

对 4 组不同亮度的图像分别作自动调焦。每次自动对焦过程共采集 11 幅图像，每组图像的第 7 幅图最清晰，即准确对焦位置。用 Matlab 软件计算每组图像评价函数曲线并归一化，重复自动对焦过程两次作为比较，如图 7 中两条曲线所示。

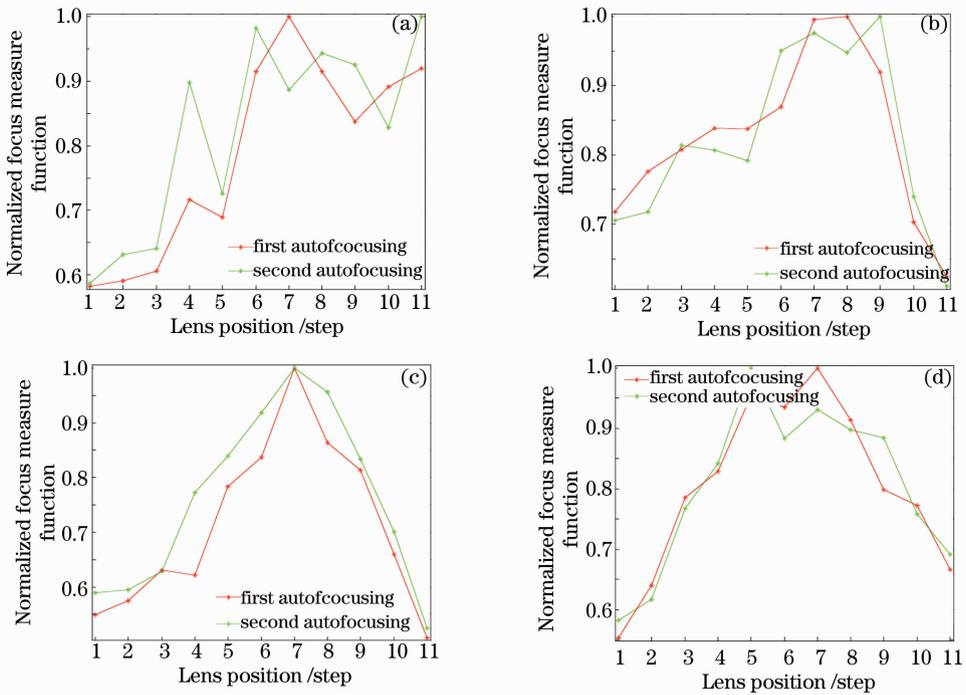


图 7 不同光照度的评价函数曲线图。(a) 2200 lux; (b) 16000 lux; (c) 30000 lux; (d) 48000 lux

Fig. 7 Focus measures curves with different illuminations. (a) 2200 lux; (b) 16000 lux; (c) 30000 lux; (d) 48000 lux

图 7(a)~(d) 分别对应 4 种不同光照度时的图像对焦评价函数曲线图。当图像的信噪比较低时, 评价函数曲线与理想曲线形状相比有较大差异, 并且重复自动对焦过程时, 最佳对焦位置左右波动, 出现错误对焦; 当图像的信噪比升高时, 评价函数曲线逐渐趋于平滑, 重复对焦过程时最佳对焦位置重合,

图像法自动调焦准确, 证明了信噪比高自动调焦准确率高这一结论。

为了验证信噪比对调焦精度的影响, 对每组不同信噪比的靶标图像重复对焦, 计算对焦评价函数曲线, 记录最佳对焦位置和准确对焦的次数, 计算对焦准确率, 如表 2 所示。

表 2 不同信噪比图像自动对焦准确率

Table 2 Auto-focusing precision of different R_{SN} images

R_{SN}/dB	Focusing times	Accurate focusing times	Precision /%	Mean square deviation
27	20	11	55	0.2620
33	30	22	73.33	0.0761
39	30	26	86.67	0.0611
34	20	14	70	0.1478

表 2 中数据表明, 当图像的信噪比由 27 dB 升高到 39 dB 时, 图像调焦的准确率由 55% 升高到 86.67%, 调焦精度大约提高 30% 左右。根据相机拍摄的不同信噪比图像的重复自动对焦过程, 计算多次自动对焦最佳对焦位置的方差, 做出方差值和图像光照度之间的关系曲线, 如图 8 所示。

从拟合的曲线可以看出, 图像的信噪比与计算最佳对焦位置的方差值成反比例关系。图像的信噪比越高, 通过多次成像计算的方差值越小, 图像法自动对焦精度越高。图 8 中光照度的实验拟合曲线与图 3 的理论仿真曲线得出的结论相一致, 证明了理论公式的正确性。

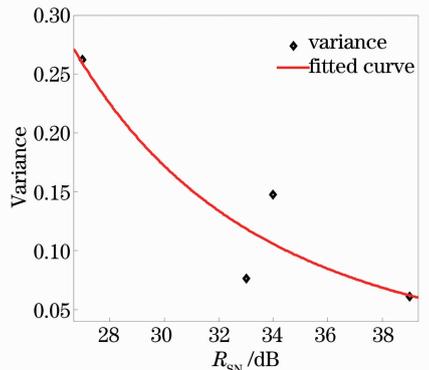


图 8 图像信噪比与方差值关系曲线

Fig. 8 Curve of variance with R_{SN}

5 结 论

针对航空相机长焦距、宽光照度成像的特点,分析了图像信噪比不同对图像自动调焦精度的影响。通过建立图像调焦的评价函数模型,描述噪声对图像调焦的影响,以评价函数的期望值和方差值作为评价标准,得出具有普遍意义的结论。图像的噪声使评价函数曲线偏离理想评价函数曲线位置,通过多次对焦过程可以有效减弱噪声的影响。信噪比影响航空相机的图像法调焦精度,图像信噪比越高,评价函数的方差值越小,表明图像调焦精度越高。当成像景物光照度为 2200~48000 lux 时,利用相机对不同信噪比的图像进行自动调焦实验,信噪比由 27 dB 升高到 39 dB 时,调焦精度提高了约 30%,验证了理论的正确性。该理论在航空相机的图像法调焦领域具有重要意义。

参 考 文 献

- Lan Gongpu, Wang Xuan, Liang Wei, *et al.*. Optical design and thermal analysis for the active-focusing aerial camera objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322006.
蓝公仆, 汪旋, 梁伟, 等. 主动调焦式航空相机物镜光学设计及温度仿真分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322006.
- 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.
- Xu Zhitao, Liu Jinguo, Long Kehui, *et al.*. Accuracy analysis of focusing mechanism of high resolution space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0728001.
许志涛, 刘金国, 龙科慧, 等. 高分辨率空间相机调焦机构精度分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0728001.
- 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.
- Xu Zhaolin, Zhao Yuliang, Zhang Guodong. Design of an auto-focusing system for a new type of aerial camera [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(4): 77-80.
许兆林, 赵育良, 张国栋. 新型航空相机自动调焦系统的设计[J]. *电光与控制*, 2011, 18(4): 77-80.
- M Subbarao, T Choi, A Nikzad. Focusing techniques [C]. *SPIE*, 1993, 11(32): 2824-2836.
- Zhao Yuliang, Xu Zhaolin. Autocollimation location system of aerial camera lens' focus plane based on image processing technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 288-292.
赵育良, 许兆林. 基于图像处理技术的航空相机镜头焦面自准直定位研究[J]. *应用光学*, 2012, 33(2): 288-292.
- Yang Quan, Liu Jinghong, Ma Xiaofei. Auto-focusing method based on image processing for airborne electro-optical imaging platform [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(5): 677-682.
杨权, 刘晶红, 马晓飞. 基于图像处理的机载光电平台自动调焦方法[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(5): 677-682.
- Xu Bohong. The Study on Image Processing Based Auto-focus Method and its System Realization [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. 13-63.
徐博泓. 基于图像的自动调焦方法研究及系统实现[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010. 13-63.
- Yi Yao, Besma Abidi, Narjes Doggaz, *et al.*. Evaluation of sharpness measures and search algorithms for the auto-focusing of high magnification images [C]. *SPIE*, 2006, 6246: 62460G.
- Lu Zhenhua, Guo Yongfei, Li Yunfei, *et al.*. Realization of auto-focus on APRC using CCD stitching [J]. *Optic and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1559-1565.
卢振华, 郭永飞, 李云飞, 等. 利用 CCD 拼接实现推扫式遥感相机的自动调焦[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1559-1565.
- Zhao Zhibin, Liu Jinghong. Auto-focusing method for airborne image equipment based on image processing [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(6): 863-868.
赵志彬, 刘晶红. 基于图像处理的航空成像设备自动调焦设计[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(6): 863-868.
- Chen Guojin, Zhu Miaofen, Zhang Kesong. Image definition evaluation function in auto-focusing process [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, 24(2): 165-169.
陈国金, 朱妙芬, 张克松. 图像调焦过程的清晰度评价函数研究[J]. *数据采集与处理*, 2009, 24(2): 165-169.
- Chen Fang, Zhang Cunji, Han Yanxiang, *et al.*. Fast focus on simple image[J]. *Optic and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 220-227.
陈芳, 张存继, 韩延祥, 等. 简单图像的快速聚焦[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 220-227.
- Murali Subbarao, Jenn Kwei Tyan. Selecting the optimal focus measure for auto-focusing and depth-from-focus [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(8): 864-870.
- 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.
- Zhou Liping, Sun Zhijun, Zhang Quan. Auto focusing and control of micro-vision system [J]. *Optic and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 807-812.
周丽平, 孙志峻, 张泉. 显微视觉系统的自动聚焦及控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 807-812.
- Zhao Zhibin, Liu Jinghong. Power spectra-based auto-focusing method for airborne optoelectronic platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3495-3500.
赵志彬, 刘晶红. 基于图像功率谱的航空光电平台自动检焦设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3495-3500.
- J K Tyan. Analysis and Application of Auto-focusing and Three-Dimensional Shape Recovery Techniques Based on Image Focus and Defocus [D]. Stony Brook: State University of New York, 1997. 51-108.
- Chen Xiaobin. 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]. *通讯技术*, 2010, 43(6): 210-212.