

文章编号:1007-2780(2010)06-0863-06

## 基于图像处理的航空成像设备自动调焦设计

赵志彬<sup>1,2</sup>, 刘晶红<sup>1\*</sup>

(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 100039)

**摘 要:** 针对当前航空成像设备中自动调焦装置结构复杂、不利于集成的问题, 对基于图像处理的自动调焦方法在航空成像设备中的应用进行了研究。根据自然图像斜边缘多于水平和垂直边缘的特点, 提出了基于图像斜边缘检测的对焦评价算子(Lean 算子)。通过对多种对焦评价算子进行试验比较, 分别选取斜边缘检测算子和卷积算子作为调焦粗搜索和精搜索阶段的对焦评价算子。针对航空成像设备光学系统的特点, 提出了局部全局搜索算法(LFS)和变步长的爬山搜索算法(CHS), 使用调焦行程为 130 步, 焦深为 2 步的变焦镜头, 分别将调焦时间由全局搜索算法的 43 s 缩短至 7 s 和 5~8 s。实验结果表明: 将所提出的对焦评价算子和搜索算法结合使用, 能够准确实现自动聚焦, 准确度达到 95% 以上。

**关 键 词:** 航空成像设备; 对焦评价函数; 图像斜边缘检测; 搜索策略; 局部全局搜索法; 爬山搜索法

中图分类号: TP391.41; TH761.6

文献标识码: A

## Auto-Focusing Method for Airborne Image Equipment Based on Image Processing

ZHAO Zhi-bin<sup>1,2</sup>, LIU Jing-hong<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The actual auto-focusing devices in airborne image equipment have the problem of complexity in design and unable to integrate. In order to solve this problem, the application of image based on auto-focusing method in airborne image equipment was presented. According to that the gradient edges in normal images are more than horizontal and vertical edges, a new focus measure method (Lean operator) derived from gradient edge detection was proposed. Series of experiments were committed to have the Lean method compared with the other several kinds of auto-focusing method. According to the experiment results, the Lean operator and correlation operator were respectively chosen as the focus measure method of coarse search and fine search. Then, local full search (LFS) strategy and change step hill-climb search (CHS) strategy were proposed in allusion to the feature of focus measure function of airborne image equipment. When using a lens of 130 steps focus length and 2 steps focus depth, the LFS and CHS search strategy can respectively cut the total focus time from the full search's 43 s to 7 s and 5~8 s. The results show that the correlation operator with the cooperation of the lean operator can locate the prime focus position accurately, the accuracy is

收稿日期: 2010-07-20; 修订日期: 2010-08-17

基金项目: 国家“973”基金资助项目(No. 2009CB72400105)

作者简介: 赵志彬(1984—), 男, 河南洛阳人, 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。

\* 通讯联系人, E-mail: liu1577@126.com

over 95%.

**Key words:** airborne image equipment; focus measure function; image lean edge detection; search strategy; local full search; hill-climb search

## 1 引 言

目前,高性能的航空成像设备正在向着高空斜视、远距离目标侦察的方向发展。为了实现对远距离目标的识别跟踪,光学系统的焦距必须足够长;随之而来的问题是,光学系统的长焦距会导致极小的焦深,由于环境条件(温度、大气压力)变化引起的镜头后截距变化很容易造成光学系统的离焦,引起的分辨力急剧下降,使得航空成像设备对目标的识别跟踪能力大大降低。实时精确的自动调焦技术在航空成像设备中的应用非常关键。

当前航空成像设备大多靠光学设计保证足够的焦深或采用光学补偿解决光学系统的离焦问题;但随着焦距的加大,此种方法对光学设计、机械设计和光机加工要求越来越高<sup>[1-2]</sup>。文献[3]提出了一种光栅调焦法,通过一系列复杂的机械和光电装置完成航空成像设备的自动调焦。此方法需要额外的调焦装置,增加了航空成像设备的体积和重量,与航空成像设备的小型化、轻量化趋势相矛盾,同时也降低了系统可靠性,增加了系统成本。

基于图像处理的自动调焦方法根据实时获取的图像计算对焦评价值,从而判断当前的离焦状态,然后完成聚焦操作。和以往的调焦方法相比,基于图像处理的自动调焦方法具有设计简单、集成化程度高和便于升级等诸多优点,在民用相机、显微镜成像和机器视觉等领域有着广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。本文针对航空成像设备的特点对多种对焦评价算法和自动调焦搜索算法进行了研究试验,提出了基于图像处理的航空成像设备的自动调焦方法。

## 2 对焦评价函数的选取

### 2.1 常用的对焦评价函数

自动调焦首先要解决的问题就是从获取的图像中计算出对焦评价值,作为自动调焦的依据。国内外很多学者针对不同应用领域对多种对焦评价函数进行了大量的研究工作,提出了多种图像

对焦评价方法<sup>[6-9]</sup>,主要有以下 3 类:

(1) 基于梯度的对焦评价算子。主要有微分梯度、Sobel 梯度、Laplacian 梯度、FSWM 算子和 Krisch 算子等;

(2) 基于统计的对焦评价算子。主要有 ACM 算子和信息熵算子;

(3) 基于变换的对焦评价算子。主要有基于 FFT 的对焦评价算子和基于 DCT 的对焦评价算子。

### 2.2 斜边缘检测对焦评价算子

从微分梯度、Sobel 算子和 Laplacian 算子模板的特点来看,这几种算子都是计算  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向上像素灰度的差值。Krisch 算子对 8 个方向上的像素灰度差值分别做了计算,但其运算量为 Sobel 和 Laplacian 算子的 4 倍。在实际自然图像中,斜图像边缘多于水平和垂直的图像边缘。根据这一特点,本文提出了一种对 Sobel 算子改进的算子:斜边缘检测算子(Lean)。如式(1)所示:

$$L = \sum_M \sum_N (|I_x| + |I_y|),$$

$$|I_x| + |I_y| > T$$

$$h_x = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix}, h_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

(1)

斜边缘检测算子对图像每个像素八邻域内  $\pm 45^\circ$  方向的像素灰度做差值运算,更符合自然图像边缘分布特征,可以更有效地检测图像边缘。本文使用  $512 \times 512$  大小的标准 Lena 图像对 Sobel 和 Lean 边缘检测算子进行效果比较,如图 1 所示。从人眼的观察来看,Lean 算子能够检测到 Sobel 算子未能检测到的边缘,如图像右下角部分。在图像的面部和假发区域,Lean 算子的边缘检测效果优于 Sobel 算子。将所有灰度值大于 10 的边缘求和作为衡量所检测到的边缘的数量,Lean 算子所检测的边缘数量比 Sobel 算子多 12.9%。若将 Sobel 算子和 Lean 算子一起用于图

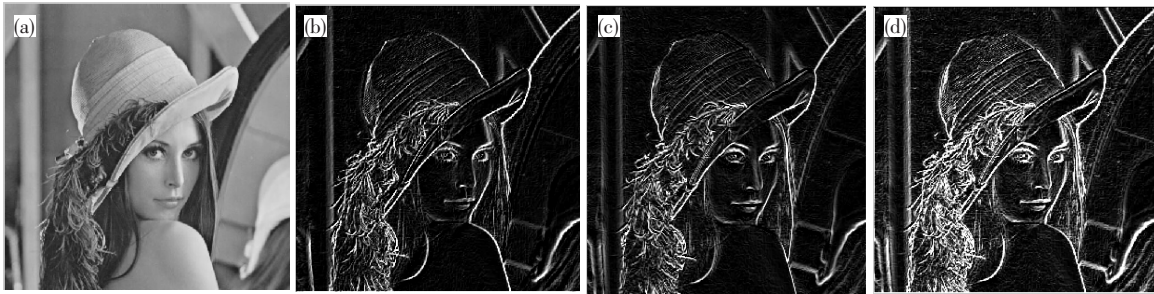


图 1 Lean 和 Sobe 算子边缘检测效果比较。(a)Lena 原图;(b)Sobel 算子;(c)Lean 算子;(d)Sobel+Lean 算子。  
Fig.1 Performance comparison between lean and sobel edge-detect operator. (a) Original lena; (b) Sobel operator; (c) Lean operator; (d)Sobel+Lean operator.

像的边缘检测,得到的图像如图 1(d)所示,Lean 检测到的边缘比 Sobel 多 89.8%。

2.3 对焦评价函数的选择

为了选择适合航空成像设备自动调焦的对焦评价函数,本文选择 7 种计算简单、易于工程实现的对焦评价算子进行了效果评估实验,分别是 ACM 算子、SMD 算子、Brenner 函数、Correlation 算子、Laplacian 算子、Lean 算子和 Sobel 算子。

为了准确反映航空成像设备调焦的特点,必须选用长焦距、短焦深的光学镜头进行各种对焦评价函数的评估实验,但选择几百毫米量级的变焦镜头会由于作用距离太远给标靶的放置和位置测量带来不便。为了方便试验,本文采用 Sony 的 XC-EI30CE CCD 摄像机配合焦距为 5.8~69.6 mm 的 Raymax 镜头进行预演试验。通过电机控制板将镜头的焦距值离散化为 31~160,共 130 步的数字焦距。实验镜头的焦深大约为 2 步,为整个调焦行程的 1/65,和实际的航空成像设备光学系统类似。将贴有航拍照片的试验标板放在 120 步焦距所对应的像距位置,在焦距的范围内每间隔

2 步进行一幅图像的采集,共采集 65 幅图像。用 7 种对焦评价算子分别计算图像序列的对焦评价价值,得到的对焦评价曲线如图 2 所示。为了方便不同对焦评价函数之间的比较,将对焦评价曲线进行了归一化处理。

一个理想的对焦评价函数应具有无偏性、单峰性、灵敏度高、信噪比好和计算量小等特性。从初步的观察来看,除了 ACM 算子,其他对焦评价算子都有着很好的无偏性和单峰性;此外,卷积算子和 Laplacian 算子具有较好的灵敏度。为了对各个对焦评价方法有一个客观的评价,定义了以下几种评价对焦评价算子性能的标准:

(1)误差

用调焦曲线的峰值点偏离最佳成像位置的电机步数对误差进行衡量。

(2)灵敏度

灵敏度能够指示曲线对图像离焦的敏感程度,高的灵敏度意味着少量的离焦会导致曲线的迅速衰减。定义灵敏度的评价公式如下:

$$K = \sum_{i=-3}^3 \frac{1}{|i| f(R+i \times 2)}, i \neq 0, \quad (2)$$

式中,R 为对焦评价曲线峰值的电机位置,i 为电机步数,f()为对焦评价价值。

(3)有效调焦区域

由于航空成像设备具有很宽的焦距范围和小焦深,所以航空成像设备的对焦评价函数具有很范围的饱和区,平坦的饱和区对最佳成像位置的搜索十分不利。定义有效调焦区域为大于饱和区对焦评价价值平均值 1.3 倍的评价点的个数。大的有效调焦区域有助于加大搜索步长,从而减小调焦时间。

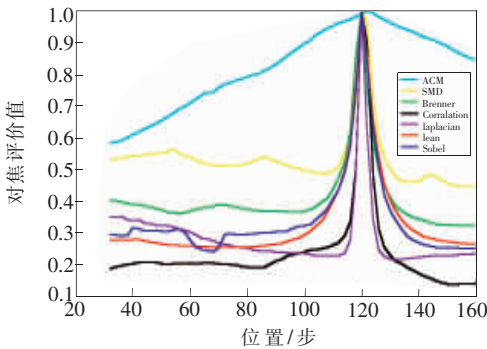


图 2 7 种对焦评价算子的对焦评价曲线  
Fig.2 Focus measure curves of 7 kinds of focus measure operator

(4)运算量

用处理每个像素点的运算量来衡量对焦评价算子的运算量。

各种对焦评价算子的性能参数如表 1 所示。

通过对对焦评价曲线各项性能的量化,可以对算法的效果有一个更客观的评判,另外,这些性能参数也可以作为设计搜索算法的依据。

从表 1 可以看出 Laplacian 和 Correlation 算

表 1 7 种对焦评价曲线的性能参数

Table 1 Performances of 7 focus measure operators

算子	调焦误差(步)	灵敏度	有效调焦区域(步)	每个像素点运算量
ACM	2	3.72	60	3 次加法
SMD	0	5.14	8	4 次加法
Brenner	0	5.45	14	4 次加法
Correlation	0	7.88	14	2 次乘法 2 次加法
Laplacian	0	9.77	8	9 次乘法 9 次加法
Lean	0	5.35	26	4 次乘法 12 次加法
Sobel	0	5.56	20	4 次乘法 12 次加法

子具有较高的灵敏度,高灵敏度有利于最佳成像位置的准确定位,适合在精搜索阶段使用。宽的有效调焦区域可以在粗搜索阶段使用大步长,从而迅速定位最佳成像位置的大概范围,ACM 算子的有效调焦区域最宽;但在试验中发现,对不同的成像目标进行试验时,ACM 算法的结果有很大的波动,有时会出现严重偏离最佳区域的现象,这是由于 ACM 是基于统计平均值的方法,而图像的统计值容易随内容的不同发生很大的波动。本文所提出的 Lean 算子具有较好的灵敏度和有效调焦区域,运算量和 Sobel 算子相当,综合各方面的考虑,选择 Lean 算子作为本文搜索算法的粗搜索阶段的对焦评价算子。

3 调焦搜索算法

除了对焦评价函数的选择,对焦深度法(DFF)面临的第二个问题就是如何从一系列图像的对焦评价值中找出最优的聚焦位置,即调焦搜索策略的选择。从图 2 可以看出,除了 ACM 算法,其他几种算法的对焦评价函数都有很大范围的饱和区。在饱和区内,对焦评价函数的走势并不能反映出调焦的方向,对搜索算法来说,饱和区属于无意义区域。为最大限度减少调焦时间,在设计搜索算法时可将搜索算法分为两个阶段:一是粗搜索阶段,先找到对焦评价函数的有效调焦区域;二是精搜索阶段,在有效调焦区域内找到最佳成像位置。在设计搜索算法时,最大限度地减少采样点数和电机移动步数才能得到最短的调焦时间。

3.1 粗搜索算法

为了在粗搜索阶段使电机搜索的步数最少,应使用尽可能大的搜索步长。要保证在有效调焦区域内至少有一个采样点,搜索步长应小于等于有效调焦区域的宽度。从表 1 可以看出,Lean 和 Sobel 算法的有效调焦区域比较大,考虑到所采用的光学镜头的焦距范围为 31~160 步,在粗搜索阶段使用 20 步的搜索步长,分别在 35,55,75,95,115,135,155 步的位置依次采集图像,使用 Lean 算子计算对焦评价值,对焦评价值最大的位置,即有效调焦区域。粗搜索算法的流程图如图 3 所示。

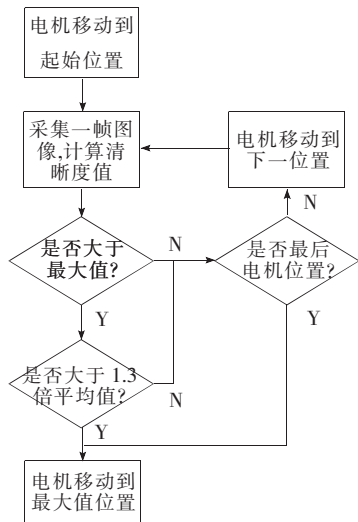


图 3 粗搜索算法流程图

Fig. 3 Flow chart of coarse search algorithm

3.2 精搜索算法

在精搜索阶段,要求采用灵敏度高的对焦评

价算子,才能更精确地定位最佳成像位置。另外,由于精搜索是在粗搜索之后进行的,为了保证粗搜索阶段的结果在精搜索阶段继续有效,精搜索阶段所采用的对焦评价函数也应该具有一定宽度的有效调焦区域。从表 1 中各种对焦评价算法的性能参数来看,卷积算子的灵敏度和有效调焦区域性能都比较好,在精搜索阶段选择卷积算子计算图像的对焦评价值。针对调焦曲线的特点,设计了两种精搜索搜索算法:变步长爬山搜索法和局部全局搜索法。

3.2.1 爬山搜索法

通过对爬山搜索法步长量级的启发式选择,爬山法能够收敛到最优的聚焦点。通过对步长选择方法、终止条件和搜索窗等的修改,不同的爬山搜索算法已经被提出。根据已经试验测得的对焦评价曲线的特点,本文分别采用 6 步长和 2 步长进行爬山式搜索,6 步长的搜索在曲线的有效调焦区域内快速收敛到更加接近最佳成像位置的位置,2 步长可以准确定位到最佳成像位置的焦深范围内。爬山搜索法的流程图如图 4(a)所示。

3.2.2 局部全局搜索法

爬山搜索法虽然有着很好的收敛性能,但爬

山搜索法的缺陷是它的不确定性,不同的成像位置的搜索反复的情况不同,最终到达聚焦位置所经历的步进数和时间也不确定。针对这一缺点,本文设计了局部全局精搜索算法。首先,在对以粗搜索得到的最佳成像位置为中心的 5 个采集点进行局部的全局搜索,搜索步长为 6 步,得到新的最佳成像位置;然后,对以新的成像位置为中心的 3 个采样点进行局部全局搜索,搜索步长为 2 步。局部全局搜索算法能够逐步逼近最佳的成像位置,总的采样点数为 8,搜索的步长和点数确定,因此所消耗的时间也确定。局部全局搜索算法的流程图如图 4(b)所示。

4 实验与结果

实验采用 Sony 的 XC-EI30CE CCD 摄像机配合焦距为 5.8~69.6 mm 的 Raymax 镜头,在 PC 机端使用维视的图像采集卡 MV-600 进行图像的采集。在 VC++ 中完成图像对焦评价值的计算和调焦搜索算法。通过 PC 机串口发送电机控制指令到电机控制板,由电机控制板完成电机的控制和对调焦电位计数据的采集。

为了测试各种搜索算法的性能,将航拍照片贴在标靶依次放置在焦距为 60,100,140 步对应的像距位置。在 3 个位置分别使用步长为 2 的全局搜索算法、爬山搜索算法和局部全局搜索算法进行调焦实验,得到的试验数据如表 2 所示。其中全局搜索算法采用 Lean 算子计算对焦评价值,爬山搜索算法和局部全局搜索算法在粗搜索阶段使用 Lean 算子,在精搜索阶段使用卷积算子。

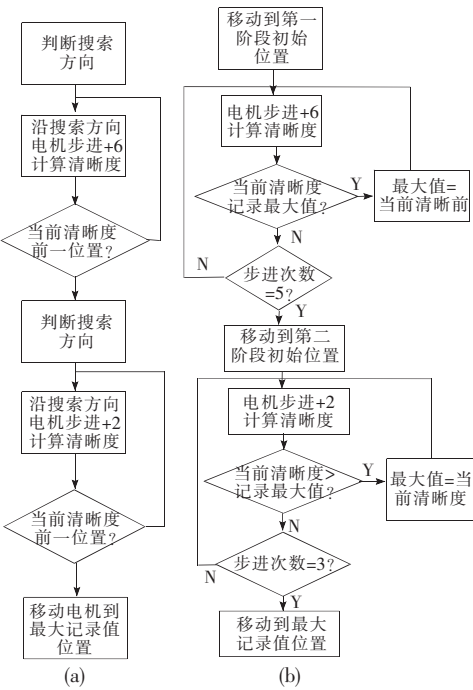


图 4 两种精搜索算法流程图。(a)爬山搜索算法;(b)局部全局搜索算法。

Fig. 4 Flow charts of two kinds of fine search algorithm.  
(a) Hill-climb search; (b) Local full search.



图 5 调焦实验的图像序列  
Fig. 5 Series of images in focus experiment



表 2  3 种调焦搜索算法性能比较  
Table 2  Performance comparison of 3 kinds of auto-focus search algorithm

标靶位置	60		100		140	
	时间(s)	误差(步)	时间(s)	误差(步)	时间(s)	误差(步)
全局搜索算法	43.0	0	43.0	0	43.0	0
爬山搜索算法	5.5	0	7.6	2	5.6	0
局部全局搜索算法	7.3	0	7.5	0	7.3	0

从表 2 数据来看,爬山搜索算法、局部全局搜索算法和拉网式的全局搜索算法相比都大大缩短了调焦时间。由于爬山搜索法的不确定性,目标处于不同位置时的搜索时间有很大波动。局部全局搜索算法虽然最短的调焦时间不如爬山搜索法,但性能稳定,适合于有干扰的场合使用。

5 结    论

针对以往航空成像设备中自动调焦装置设计复杂、不利于集成化的缺点,对图像法的自动调焦在航空成像设备应用进行了研究。根据自然图像中斜边缘的数量大于直边缘和水平边缘的特点,提出了斜边缘检测算子。对多种对焦

评价算法在长焦距、短焦深的光学镜头上进行了性能测试,并提出了相应的对焦评价函数性能量化标准。试验发现,ACM 算子、Lean 算子和 Sobel 算子的有效调焦区域性能比较好;Laplacian 算子和卷积算子的灵敏度比较好。出于稳定性的考虑,在搜索算法的粗搜索阶段使用 Lean 算子,在精搜索阶段使用卷积算子。最后,针对航空成像设备光学系统长焦距、短焦深的特点设计了两种粗搜索结合精搜索的搜索策略:爬山搜索法和局部全局搜索法。两种搜索策略分别可以将调焦时间从全局搜索法的 43 s 缩短至 5~8 s 和 7 s,证明图像法自动调焦在航空成像设备上的应用是有效的。

参 考 文 献:

[1] 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.  
[2] 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.  
[3] 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.  
[4] 孙杰, 袁跃飞, 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.  
[5] 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.  
[6] 杨守旺, 龙科慧, 周磊, 等. 航空相机调焦单元仿真系统的实时显示方法研究 [J]. 液晶与显示, 2009, 24(5): 736-740.  
[7] 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.  
[8] 任四刚, 李见为, 谢利利. 基于灰度差分法的自动调焦技术 [J]. 光电工程, 2003, 30(2): 53-55.  
[9] 郑玉珍, 吴勇, 倪旭翔. 实时自动对焦的研究 [J]. 光电工程, 2004, 31(4): 64-66.