

文章编号:1007-2780(2016)05-0484-07

单幅图像估计离焦量的航空摄像机自动调焦系统

王 昊^{1,2*}, 张 涛¹, 张 振³, 刘晶红¹, 宋玉龙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. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 陆军航空兵学院, 北京 101123)

摘要:为了改进航空相机自动调焦的方法,解决传统对焦深度法自身不可避免的多峰值问题和实时性问题。本文提出一种新型自动调焦方法,建立了调焦模型,并通过实验装置验证了该方法,调焦时间相比传统方法短,实现了一次定位的调焦方法。首先,通过采集大量不同离焦程度的自然图像作为分析样本的总体,对总体中分类采样出小块样本进行运算分析,经过迭代运算获得所需模板;然后,在凸轮机构完成粗调焦以后采集当前图像,通过对当前图像采样,把采集的样本小块放入建立好的模板中计算,得到当前镜头的离焦量。最后,根据离焦量的结果,换算为调焦执行机构的位移量,驱动调焦电机移动相应位移完成调焦。实验结果表明:在目前实验条件下离焦量计算时间为0.4 s,较传统方法的4~8 s调焦时间有了大幅度提高。在保证调焦精度的前提下,实现了一种具有实时性的自动调焦方法。

关键词:航空相机;自动调焦;图像处理

中图分类号:TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163105.0484

System of aerial camera auto-focus based on defocus estimate by single image

WAHG Hao^{1,2*}, ZHANG Tao¹, ZHANG Zhen³, LIU Jing-hong¹, SONG Yu-long¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Chinese People's Liberation Army Aviation School, Beijing 101123, China)*

Abstract: In order to solve inevitably multimodal issues and real time problems of traditional focus depth method used in aerial camera, a new method for auto-focus is presented. A focus model is established, and the method is verified by modeling and experiments. Firstly, a large number of different defocus degree of natural images, which are used as the overall sample, are collected. The sample patch from the overall sample is analyzed, and the desire template is got by iteration. Secondly, after the cam completes the coarse focus, the current image is acquired. Then, the sample patches are put into the template through sampling the current image, and the current defocus level is got by

收稿日期:2015-06-19; **修订日期:**2015-08-10.

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(No. 2009CB72400603B)

Supported by National Program on Key Basic Research Project(973 program)(No. 2009CB72400603B)

* 通信联系人, E-mail:15068607@qq.com

calculating defocus. Finally, according to the result of the defocus, the displacement of the actuator is converted. Then, the focus motor is driven to make the movement. The results show that the time to calculate defocus is 0.4 s, which has a great improvement compared with the traditional method whose focus time is 4~8 s. A real-time automatic focus method ensuring the focus accuracy is achieved.

Key words: aerial camera; auto focus; image processing

1 引 言

自动调焦系统在航空摄像机中有着至关重要的地位,与成像的清晰程度有着直接的关系^[1-3]。目前普通相机中的自动调焦系统一般只采用凸轮机构就可以直接满足调焦需求。凸轮在调焦系统中作为一个控制变倍镜组和补偿镜组之间的位置关系的机械结构,只要加工精度达到指标要求,可以在正常自然环境中达到精确调焦的目的;由于航空摄像机受其工作的特殊环境影响(高温,气压高,目标距离远等),其调焦系统仅由凸轮机构已经不能满足精确调焦的目的,需额外进行手动或自动调焦^[4]。

目前的自动调焦方法有自准直调焦方法,对焦深度法,离焦深度法等等^[5-8]。在工程中应用最为广泛的为对焦深度法,对焦深度法的原理为对一系列逐渐变化的图像通过一个评价函数进行评价,根据所用评价函数得到最清晰的图像的评价结果,则该图像所对应调焦位置即为对焦位置。通过更换更好的算子可以提高调焦算法的实际应用性能,理论上可以达到单峰性,无偏性等理想状态^[9-11]。但是在工程应用中多峰值情况经常出现,而且实时性问题是无法靠改变算子能够得到解决的,尤其在飞机高速飞行的状态下,很难通过对焦深度法找到最佳焦面位置完成镜头对焦,达到是捕捉图像或视频达到清晰的目的。文献[12]中通过对对焦深度法的优化和对算子的选取使航空相机自动调焦方法得到了一定的提高,调焦时间为 4~8 s。

在变焦距调焦系统中,只有当像落在像面时成像才最为清晰,即为对焦状态;其他状态均为离焦状态。造成离焦的原因有很多,如温度,气压等环境因素^[13]。如果分别分析造成离焦的各种因素,会使自动调焦系统的设计过于复杂,本文设计了一种直接有效的方法,能通过当前镜头捕捉的图像判分析出系统离焦状态,进而量化,再通过执

行机构(调焦镜组电机)进行调整,使系统达到对焦状态。

本文中的自动调焦方法克服了对焦深度法不能实时性和实际应用中评价函数多峰值等缺点^[14-15],在自动调焦领域提出了一种新的基于图像处理的调焦方式。

2 研究方法

本文在自动调焦系统中所应用的方法拟定如下:首先采集大量自然景象作为样本进行训练学习,通过样本建立离焦标准模型,然后对所分析图像与所建立模型进行计算得到所需离焦信息,最后通过执行机构调整调焦组的位置完成自动调焦。

傅里叶功率谱目前被广泛应用于图像处理技术中,作为一项图像的清晰的重要评价依据为图像的离焦与对焦提供了特征信息。本文从图像的一维功率谱入手,以往的研究表明,不同的景物用功率谱的方法在空间频域进行分析表明,在拍摄条件相同的情况下,他们的功率谱大致相同,在随着空间频率的增加,不同的图像一维功率谱大致以 A/f^k 的趋势衰减,其中 A 为图像对比度常量, k 为指数变量(1.81~2.05),这一特征被称为图像功率谱的不变性。

频域滤波作为在数字图像处理中一种常用的手段被广泛使用。它的原理是在频域范围内,对某些特定的频率进行抑制,而其他频率不受影响,类似于我们日常生活中的筛子的作用,在本文中可以用来提取频域中不同离焦程度图像的特征信息。

在众多 m 幅图像中,根据图像离焦程度的不同,可以分为 k 组,分别作 FFT,然后对每一幅图像分别对 n 个特定频率的幅值进行记录作为一行,得到 $m \times n$ 的矩阵 I ,一共假设我们有一个列向量 $w(n \times 1)$ 作为滤波器,能分别够提取 k 组不同离焦程度图像的功率谱中特征信息,滤掉其他

非特征信息,根据得到的特征信息作为不同离焦程度图像区分的依据。

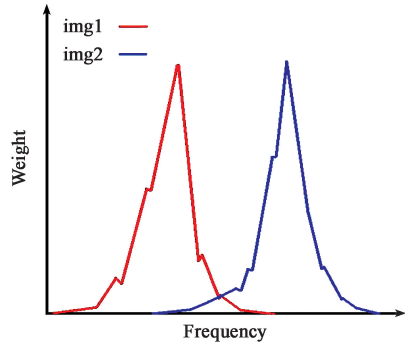


图 1 理想滤波器假设图
Fig.1 Assuming ideal filter Figure

图 1 为两组不同离焦度的图像经过 w 滤波得到的点所连接而成的曲线;其中 Weight 为功率谱与滤波器 w 相乘得到的结果;理论上若有 img3 图像组,其离焦程度介于 img1 与 img2 之间,则经过滤波得到点所连接曲线应为图 3 所示。

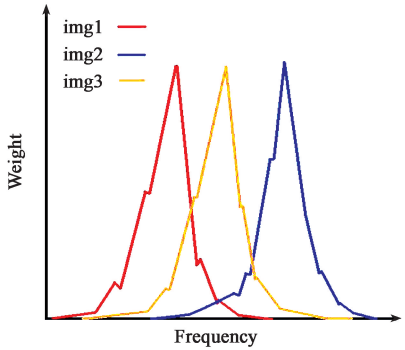


图 2 理想滤波器假设图
Fig.2 Assuming ideal filter Figure

考虑到需要将离焦程度量化的问题,我们需要估计出未知离焦量图像组 img3 与已知离焦量图像组 img1 和 img2 两个图像组的关系,将曲线关系转化为平面区域关系较为直观。如果我们有二个不同的滤波器 w_1 和 w_2 ,都可以提取出图像功率谱中的离焦信息,分别对 img1 组与 img2 组图像滤波,得到结果分别作为横纵坐标在平面上做点,我们可以得到图 3,进而通过对两组图像得到的点求得均值和方差,依此做出高斯拟合得到如图 4 的区域分布。

在以上模型基础上,对任意图像 img3 进行分析,对应可以得到图 5。

根据所处理图像得到点的分布情况,通过概

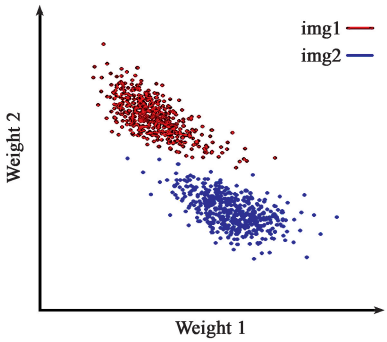


图 3 不同离焦度图像在坐标系的分布
Fig.3 Distribution of different defocused image in the coordinate system

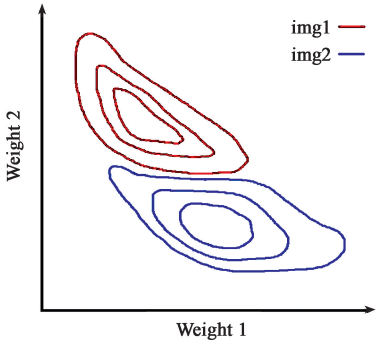


图 4 分布区域的高斯拟合
Fig.4 Gaussian fitting of distribution area

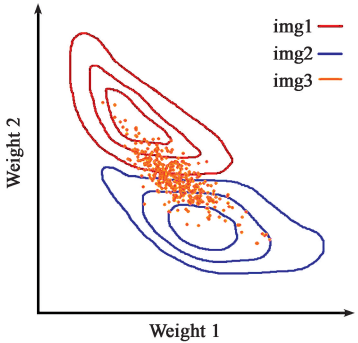


图 5 任意图像的分布结果
Fig.5 The results of distribution for arbitrary image

率统计估计出该图像点的分布在各个不同离焦度区域分布的概率,然后进行加权运算得到估计的离焦量,如式(2)所示:

$$\hat{\Delta D} = \sum_{j=1}^N \Delta D_j p(\Delta D_j | R), \quad (1)$$

式中: ΔD_j 为第 j 组离焦图像的离焦程度, $p(\Delta D_j | R)$ 为所采自然图像分布在以 R 为滤波响应的分布中分布在第 j 组区域的概率。以上为本

文所提出的基于单幅图像的离焦量估计方法的基本原理。

3 所需滤波器的计算

如果任意一幅图像用向量 m 表示,那么 $m(k)$ 表示某一离焦度的图像。采样小块用向量 s 表示,则 s 可以用参数 k, l 表示,记做 $s(k, l)$;其中 l 表示其身份是 k 中的样本。由此,任意图像 m 的数据可由采样小块 s 来估计,即由联合概率 $p_0(k, l)$ 来表示。

对于任意 $s(k, l)$,设存在一个随机滤波器 $R_q(k, l)$,则它的响应区域为 $g(x)$;理想中我们需要的滤波器为 $r_q(k, l)$,它的响应区域为 $f(x)$ 。由于 $R_q(k, l)$ 为随机滤波器,则响应 $g(x)$ 也为随机响应。根据蒙特卡洛仿真原理,如果 $r_q(k, l)$ 足够准确,那么 $f(x)$ 为 $g(x)$ 在一定区域内的平均值。

关系熵可以作为一个衡量 $f(x)$ 和 $g(x)$ 概率区域差异程度的标准:

$$D = \sum_x f(x) \log \frac{f(x)}{g(x)} . \tag{2}$$

关系熵在精确表达两个概率区域间不确定差异的中有着重要的作用,在本文的方法中,平均关系熵可以归纳为下面的形式:

$$D_q(k, l) = -E[\log p(k | R_q(k, l))] , \tag{3}$$

可知当相应图像的后验概率为 1.0 的时候 D_q 单调递减为 0;由此,整体所有采样下 D_q 平均值为最小的时候对理想滤波器的估计正确程度达到的最大化。 D_q 平均值为:

$$\bar{D}_q = -\sum_{k,l} p_0(k, l) E[\log p(k | R_q(k, l))] , \tag{4}$$

上式中阻止最小化 $\bar{D}_q$ 的因素为所期望的对数的后验概率,只能由蒙特卡洛仿真进行计算,这样在搜寻所有可能的编码函数的时候,可能计算的极其缓慢和复杂。因此在这里我们需要做一个近似计算。我们通过给定一个随机响应假设平均相对熵,作为相对熵近似,给出的响应的平均值:

$$\begin{aligned} & -E[\log p(k | R_q(k, l))] \cong \\ & -\log p(k | E[R_q(k, l)]) = , \tag{5} \\ & -\log p(k | r_q(k, l)) \end{aligned}$$

最后,我们得到 $\bar{D}_q$ 可以被表示为总体图像和采样先验概率的关系熵的均值。因此需要大量随机

样本 (K_i, L_i) ,则我们所需要的滤波器 r_q 由最小化 $\bar{D}_q$ 作为限制条件得到:

$$\bar{D}_q = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log p(K_i | r_q(K_i, L_i)) . \tag{6}$$

4 数据的处理和实验的设计

为了取得相同离焦程度的图像,实验中选择光焦度为 0, 0.05, 0.1, 0.15 和 0.2 的 5 组光学镜片,分别添加到对焦状态的镜头前方作为实验数据采样方法。通过多组不同场景的拍摄得到大量不同场景不同离焦程度的图片作为实验的样本总体。为了验证上述方法的可行性,我们搭建了原理性验证实验装置见图 6,其中镜组 X 为代表离焦程度为 X 的镜片。

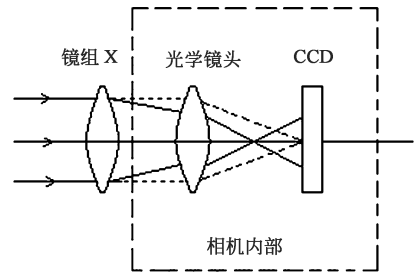


图 6 原理性实验示意图

Fig. 6 Experimental setup

每个样本都经过处理:首先转化为灰度值图像,然后做如式 8 的处理,最后对 $s(k, l)$ 归一化为幅值为 1,均值为 0 的形式。

$$s(k, l) = \log \left(\text{FFT} \left(\text{Hann} \left(\frac{x(k, l) - \bar{x}(k, l)}{\bar{x}(k, l)} \right) \right) \right) , \tag{7}$$

其中:Hann 为汉宁窗函数,FFT 为快速傅里叶变换, x 为原始图像。

按照不同离焦程度分别从不同场景的样本中取出对焦状态的图像和通过不同光焦度镜片所拍摄的图像,把样本分为 5 组。然后每组图像选取 250 个 128×128 的小样作为一个分类,一共取得 5 类,分别对应 5 种不同离焦程度。图 7 为镜头对焦状态下所得图像采样,图 8 中景物所对应的光焦度为 0.2。

通过计算得出滤波器 F1, F2。可知 F1 和 F2 可以在坐标平面上区分出不同离焦程度的图

像,经过高斯拟合得到分别对应为坐标平面上的一部分区域。以上结果作为离焦量估计的模板研究。

经过运算得到如图 10 的区域分布。

经过高斯拟合得到所需模板。完成实验准备。



图 7 对焦时的图像采样

Fig. 7 Sampling when the system is focused

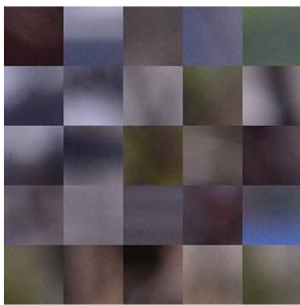


图 8 透过光焦度为 0.2 镜片得到的离焦采样

Fig. 8 Sampling when the diopter is 0.2

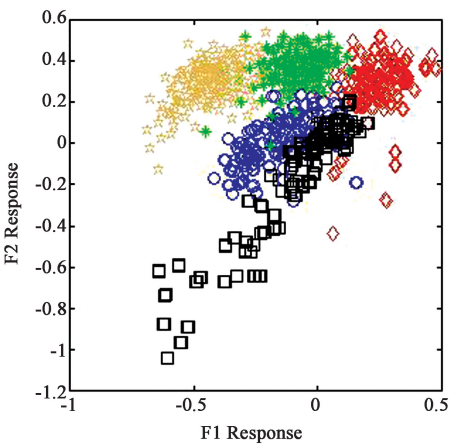


图 9 五组不同离焦度图像的分布结果

Fig. 9 Distribution for five groups of images with different defocus degree

选取任意场景某一离焦度图像采样套入模型运算,计算离焦程度,再与图像真实离焦程度做比对得到图 10。

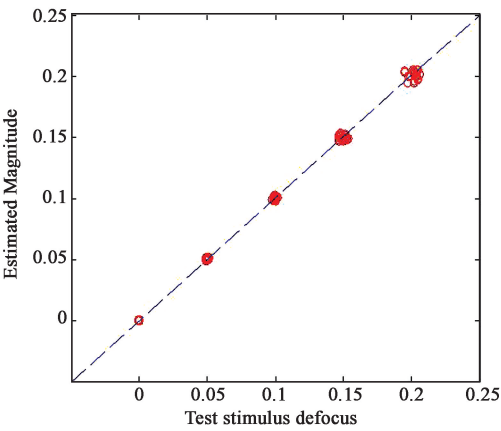


图 10 计算离焦程度结果与实际图像离焦程度比较

Fig. 10 Comparison of estimated magnitude and test stimulus defocus

设 f_1 为镜头焦距, φ_1 为镜头所对应的光焦度,则 $\varphi_1 = \frac{1}{f_1}$,所用镜组的光焦度为 φ_x ,则总体的光焦度值为 $\varphi_{\text{总}} = \varphi_x + \varphi_1$,总体焦距为 $f_{\text{总}} = \frac{1}{\varphi_{\text{总}}}$,得出添加镜组后产生焦距变化量为 $\Delta f = f_1 - f_{\text{总}}$;本实验中 $f_1 = 50 \text{ mm}$,焦深为 0.062 mm ,求得 5 组实验图像对离焦量计算误差见表 1,其中 $\Delta f_{\text{测}}$ 为通过算法得到的离焦量计算值。

表 1 计算误差(单位 mm)

Tab. 1 Error calculation(Unit mm)

ϕ_x	f_1	$f_{\text{总}}$	Δf	$\Delta f_{\text{测}}$	误差
0	50	50	0	0.004	0.004
0.05	50	48.780	1.220	1.211	0.009
0.10	50	47.619	2.381	2.365	0.016
0.15	50	46.512	3.488	3.466	0.022
0.20	50	45.455	4.545	4.514	0.031

由表 1 可以看出,5 组计算误差均在焦深 1/2 范围内。虽然 φ_x 在 0.2 时误差接近焦深的 1/2,但是在实际调焦中离焦量所对应的光焦度通常不会超过 0.1,证实了本方法的可行性。在计算出离焦程度之后,通过调焦控制系统使相应镜组到

达对焦位置,完成调焦。

5 硬件测试

为了实现本文中提出的算法,硬件上需要在传统相机的机械结构中做出调整。在调焦镜组下方加入直线电机作为驱动电机,并根据需要选择性添加光栅反馈作为位置闭环调整。通过度数与焦距的换算,得到所需移动的距离,再通过直线电机把调焦镜组移动到相应位置,完成自动调焦的过程。

所需直线电机在实验阶段选用步进电机与丝杠结合,用光栅尺作为验证反馈的结构形式,步进电机步长选为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 通过自行设计基于 TMS28335 的 DSP 开发板发出脉冲控制电机以及 QEP 模块收集光栅反馈数据测试实验表明,该定位系统开环重复定位精度为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内,在光电平台镜头焦深允许范围内,满足设备调焦精度要求,图 11 为测试设备。

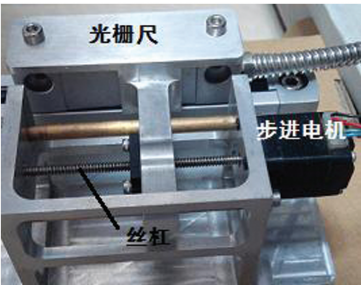


图 11 步进电机-光栅反馈系统
Fig. 11 Stepper motor-grating feedback system

本套设备满足本文中自动调焦方法(如图 12)的需求,可以应用于变倍调焦结构中,在实际生产阶段也可选用指标更高性能更好的直线电机。通过实验结果和硬件的设计及测试有效的验证了该方法的可行性和相比传统方法的优越性(如表 2)。

参 考 文 献:

[1] 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.
XU Z T, LIU J G, LONG K H, *et al.* Accuracy analysis of focusing mechanism of high resolution space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0728001. (in Chinese)
[2] 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.
XU Z L, ZHAO Y L, ZHANG G D. Design of an auto-focusing system for a new type of aerial camera [J]. *Elec-*

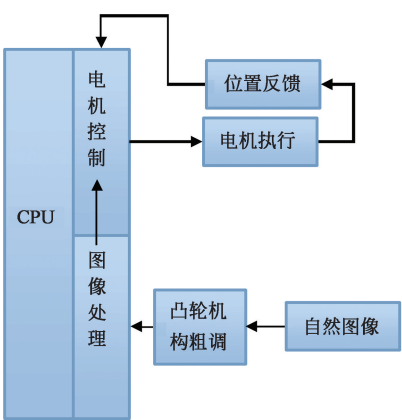


图 12 自动对焦的流程图
Fig. 12 Flowchart of auto-focus

表 2 两种方法比较
Tab. 2 Method comparison

	所需图像数	执行步骤	调焦时间/s
离焦	6~12	多步	4~8
单幅	1	一步	≤1

6 结 论

本文设计了由单幅图像计算变焦距镜头离焦程度的方法,并以此为核心设计了变倍调焦系统。该算法可以快速计算图像的离焦量,与以往的自动调焦算法有原理上的区别,并提高了航空相机自动调焦系统的实时性。实验结果表明,本文所提出的方法满足调焦精度要求,离焦量计算时间为 0.4 s ,调焦时间在 1 s 内。但是目前此方法并不完善,目前对离焦的正负区分效果并不理想,在应用中仍有一定的局限性;在实验器材方面由于镜片的定做,实验阶段没有定制高成本的任意屈光度的镜片,目前只完成本文所述方法的原理性实验,还不能反映离焦量微小变化对实验结果的影响,预期以上问题在日后的研究和学习中能够进一步得到解决。

tronics Optics & Control, 2011, 18(4): 77-80. (in Chinese)

- [3] 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.
HUI S W. Compensation for long focus oblique real-time aerial camera being out of focus [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2): 162-165. (in Chinese)
- [4] 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.
ZHOU J F, ZHAI L P, ZHOU G, *et al.* Autofocus method of aerial imaging device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 105-108. (in Chinese).
- [5] 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.
CHEN F, ZHANG C J, HAN Y X, *et al.* Fast focus on simple images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 220-227. (in Chinese)
- [6] BURGE J, GEISLER W S. Optimal defocus estimation in individual natural images [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(40): 16849-16854.
- [7] SUBBARAO M, CHOI T S, NIKZAD A. Focusing techniques [J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(11): 2824-2836.
- [8] SUBBARAO M, TYAN J K. Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(8): 864-870.
- [9] 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.
ZHAO Z B, LIU J H. Auto-focusing method for airborne image equipment based on image processing [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(6): 863-868. (in Chinese)
- [10] YAO Y, ABIDI B, DOGGAZ N, *et al.* Evaluation of sharpness measures and search algorithms for the auto focusing of high-magnification images [C]. *Proceedings of the SPIE 6246, Visual Information Processing XV, Orlando (Kissimmee)*, FL: SPIE, 2006, 6246: 62460G.
- [11] 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.
ZHOU L P, SUN Z J, ZHANG Q. Auto-focusing and control of micro-vision system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 807-812. (in Chinese)
- [12] 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.
ZHAO Z B, LIU J H. Power spectra-based auto-focusing method for airborne optoelectronic platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3495-3500. (in Chinese)
- [13] 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, 22(3): 0322006.
LAN G P, WANG X, LIANG W, *et al.* Optical design and thermal analysis for the active-focusing aerial camera objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 22(3): 0322006. (in Chinese)
- [14] 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.
ZHAO Y L, XU Z L. Autocollimation location system of aerial camera lens' focus plane based on image processing technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 288-292. (in Chinese)
- [15] 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.
SUN J, YUAN Y H, WANG C Y. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in auto-focusing criterion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1): 35-39. (in Chinese)

作者简介:王昊(1986—),男,吉林长春人,博士研究生,2010年于吉林大学获得学士学位,主要从事航空相机自动调焦及自动控制方面的研究。E-mail:15068607@qq.com