

基于多重差分滤波效应的航空相机图像检焦方法

王海江^{1,2}, 郑丽娜^{1*}, 康琦^{1,2}¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所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

摘要 焦面检测准确与否对航空相机光学系统的成像质量起着至关重要的作用。为解决航空相机检焦问题, 提出了一种基于多重差分滤波效应的检焦算法。首先, 对检焦原理进行了介绍, 在基本矩形滤波器的基础上进行设计, 提出了一种适用于航空相机检焦的新型滤波器, 消除了图像和滤波器之间相对位移产生的影响, 并从数学角度证明了其可行性。然后, 通过对图像的隔行采样对滤波器进行模拟, 以完成图像检焦算法的设计。最后, 利用实验采集的图像对所提算法的检焦效果进行了评估。实验结果表明, 所提算法可以消除矩形滤波器和图像之间相对位移产生的正弦变化; 算法灵敏度较高, 最大误差为 $41.16 \mu\text{m}$, 小于光学系统的半焦深 ($76.8 \mu\text{m}$), 能够满足工程需求。

关键词 成像系统; 航空相机; 焦面检测; 空间滤波效应

中图分类号 V241.01

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0411001

Image Focusing Method Based on Multiple Differential Filtering Effects for Aerial Cameras

Wang Haijiang^{1,2}, Zheng Lina^{1*}, Kang Qi^{1,2}¹Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 133033, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The imaging quality of the optical system in an aerial camera is significantly affected by the accuracy of focal plane detection. To resolve the focusing problem of aerial cameras, a focusing algorithm based on multiple differential filtering effects is proposed. First, the principle of focusing is expounded. With the basic rectangular filter as the design basis, a new filter suitable for focusing of aerial cameras is proposed to eliminate the influence of the relative displacement between the image and the filter, and its feasibility is proved from a mathematical point of view. Then, the filter is simulated by interlaced sampling of the image to complete the design of the image focusing algorithm. Finally, the images collected in the experiment are used to evaluate the focusing effect of this algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm can eliminate the sinusoidal change caused by the relative displacement between the rectangular filter and the image. The proposed algorithm is able to meet engineering requirements with high sensitivity and a maximum error of $41.16 \mu\text{m}$, which is smaller than the half focal depth ($76.8 \mu\text{m}$) of the optical system.

Key words image systems; aerial camera; focal plane detection; spatial filtering effect

1 引言

航空相机是搭载在飞行器上用来拍摄地面景物的光学成像设备, 被广泛应用于资源探测、军事侦察

等领域中^[1]。然而, 航空环境是非常复杂的, 温度、大气压力和成像距离等因素对航空相机都有很大的影响, 会造成离焦现象的出现进而导致图像质量下降。航空相机想要实现高清晰度、高分辨率成像, 就

收稿日期: 2021-07-16; 修回日期: 2021-08-13; 录用日期: 2021-08-20

通信作者: *ailsazheng@163.com

一定要利用实时而精确的自动检调焦技术对相机的离焦量进行补偿^[2]。

检焦技术发展到现在,可大致分为^[3-5]:1)程序控制法。其实现较为容易,但检焦精度和场景适应性较差,只在早期的航空相机(如 KS116、KA95)中使用;2)光电自准直法。其检焦结构具有很高的复杂度,故存在对焦时间长和实时性差的缺陷;3)基于图像处理技术的自动检调焦方法。其可直接对景物通过镜头在探测器上所成的图像进行分析处理,并利用频谱分析判断图像的离焦程度从而完成检焦,已经成为当前理想的检调焦技术之一^[6-8]。当前已有的图像处理检焦方法都需要对目标进行多次重复成像,而航空相机是在移动中对地面进行拍摄。此时,图像内容、梯度和纹理等信息会一直发生变化,这容易导致误判,影响结果的准确性,故普通图像检焦法不适用于航空相机^[9-10]。

为解决上述问题,本文设计了一种多重差分新型空间滤波器来进行焦面检测。对于正常的矩形滤波器而言,图像和滤波器的相对移动会对其滤波信号产生很大的影响。此时,滤波器在检焦时输出的信号呈正弦变化,该变化会导致输出信号幅值较小,滤波器抑制噪声的能力变差,从而导致检焦精度下降,甚至会出现误判现象。在新型空间滤波器中,使用多次差分来消除图像和滤波器相对位移产生的正弦效应,提高了信号的幅值与信噪比,可以更好地检取焦面位置。此外,所提方法将空间滤波器对运动目标的调制信号作为检焦判据,不直接依赖成像景物的内容,进而无需对相同景物重复成像,完全适用于航空相机的检调焦。

2 基本原理

2.1 空间滤波效应的检焦原理

空间滤波测速法(SFV)是一种利用空间滤波器检取运动目标的速度信息,并将速度测量变换为频率测量的方法^[11-12]。在一定的探测区域内,照射光被运动目标散射,散射光通过光学镜头后在空间滤波器上成像。空间滤波器具有一定的空间周期透射比,能够检取图像中特定的空间频率,最终得到的信号功率谱为

$$G_p(u, v) = F_p(u, v)H_p(u, v), \quad (1)$$

式中: u 为空间滤波器在 x 方向上的空间频率; v 为空间滤波器在 y 方向上的空间频率; $F_p(u, v)$ 为运动图像的功率谱; $H_p(u, v)$ 为空间滤波器透射函数功率谱。输出信号功率谱 $G_p(u, v)$ 由 $H_p(u, v)$ 对

$F_p(u, v)$ 线性滤波得到,如图 1 所示。由空间滤波器的周期性透射及窄带滤波特性可知, $H_p(u, v)$ 的中心频率在 $u = u_0$ 处。同时, $G_p(u, v)$ 由 $F_p(u, v)$ 和 $H_p(u, v)$ 经过频谱混叠得到,其分布特征主要由 $H_p(u, v)$ 决定,故 $G_p(u, v)$ 在 $u = u_0$ 处也会存在一个尖峰频率,并且空间滤波器的空间周期是已知的,进而可以计算出目标的速度^[13-15]。图 1 中 f 为空间滤波器的空间频率。

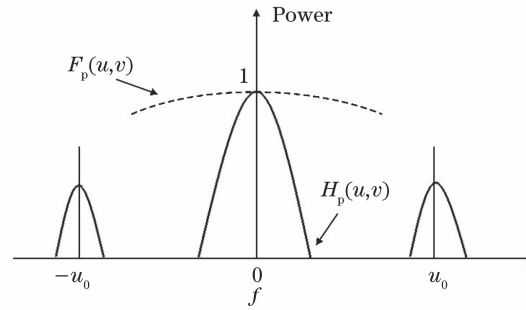


图 1 输出信号功率谱分布

Fig. 1 Power spectrum distribution of output signal

在航空遥感相机的光学成像系统中,相机离焦后会导致图像清晰度降低,该现象在频域的表现则为高频分量减少。对空间滤波器而言,由于其对较高频的空间频率成分较为敏感,故离焦时中心频率(信号成分)相对基频成分的相对强度减小,最终会导致滤波器输出信号减小。相机的离焦量越大,滤波器输出信号越小。当合焦时,滤波器输出到达最大值。因此,可以将滤波器的输出作为检焦的评价函数。

图像和滤波器的相对位移会对其输出信号产生影响,使得其输出信号呈现正弦形式的变化,而这个变化的频率表示的是图像和滤波器的相对移动速度,故可以用于速度测量。然而,对于相机相面检测来说,此种正弦变化会使得图像本身虽然包含了高频成分,但是滤波器的输出却很小,进而导致相机不能有效区分像面位置。

2.2 多重差分新型滤波器

为了消除图像和滤波器之间相对位移的影响,提出了一种新型滤波器,其由一系列等间隔排列的透光矩形构成,如图 2 所示。

图 2 中 d 为滤波器的周期, w 和 h 分别为滤波器透光区的宽度和高度,滤波器的输出为 I_c 。由空间滤波效应及 Parseval 定理可得到输出 I_{c_1} 和 I_{c_2} 的表达式为

$$I_{c_1} = \iint f(x, y)[g(x, y) - g(x - d/2, y)]dx dy = \iint F(s, t)G(s, t)ds dt, \quad (2)$$

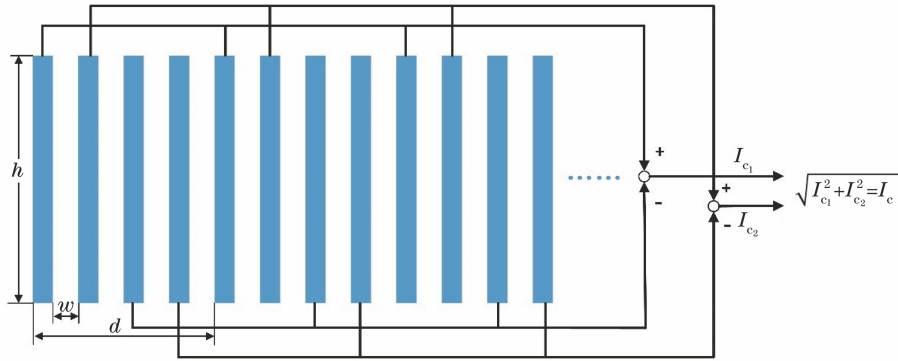


图 2 多重差分空间滤波器

Fig. 2 Multiple differential spatial filter

$$I_{c_2} = \iint f(x, y) [g(x - d/4, y) - g(x - 3d/4, y)] dx dy = \iint F(s, t) G(s, t) \exp(-j\pi s d/2) ds dt, \quad (3)$$

式中: $f(x, y)$ 为运动图像的光强分布函数; $g(x, y)$ 为滤波器光强透射函数; $F(s, t)$ 和 $G(s, t)$ 分别为 $f(x, y)$ 和 $g(x, y) - g(x - d/2, y)$ 的傅里叶变换; s 和 t 分别为 x 方向和 y 方向上的空间频率。 $g(x, y)$ 的具体表达式为

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & nd - w/2 \leq x - a \leq nd + w/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: a 表示图像与滤波器的相对位移; $n = 0, 1, 2, \dots$ 。

利用采样理论将 $G(s, t)$ 展开为一系列 sinc 函数^[16], 若空间滤波器在 x 方向的长度为 Nd , 则 $G(s, t)$ 可以利用 $s = n/Nd$ 处的采样值来表示, 其中 N 为滤波器数量, 代入(2)式和(3)式后可得

$$I_{c_1} = 4whN \sum_{-\infty}^{+\infty} (-1)^n |b_{2n+1}| \text{sinc}[\omega(2n+1)\pi/d] \times \sin\{[a + (2N-3)d/4] \times 2(2n+1)\pi/d + \phi_{2n+1}\}, \quad (5)$$

$$I_{c_2} = 4whN \sum_{-\infty}^{+\infty} (-1)^n |b_{2n+1}| \text{sinc}[\omega(2n+1)\pi/d] \times \sin\{[a + (2N-4)d/4] \times 2(2n+1)\pi/d + \phi_{2n+1}\}, \quad (6)$$

$$|b_n| \exp(j\phi_n) = \iint F(s, t) \text{sinc}(\pi t h) \text{sinc}[\pi N d (s - n/d)], \quad (7)$$

式中: b 为与采样次数相关的中间变量; ϕ 为空间滤波器与图像间的相位角。由(7)式可知, $|b_n|$ 主要由 $s = n/d$ 和 $t = 0$ 处的 $F(s, t)$ 值决定。在正常情况下, 可以认为地面目标在空间和时间上满足随机过程, 可近似为高斯或者指数分布。若空间滤波器的周期 d 选择合理, 则有

$$|b_1| \text{sinc}(\omega\pi/d) \gg |b_{2n+1}| \text{sinc}[\omega(2n+1)\pi/d], \quad (8)$$

此时, (5)式和(6)式可以近似为

$$I_{c_1} \approx 4whN |b_1| \text{sinc}(\omega\pi/d) \sin\{2[a + (2N-3)d/4]\pi/d + \phi_1\}, \quad (9)$$

$$I_{c_2} \approx -4whN |b_1| \text{sinc}(\omega\pi/d) \cos\{2[a + (2N-3)d/4]\pi/d + \phi_1\}, \quad (10)$$

可得空间滤波器的输出为

$$I_c \approx 4whN |b_1| |\text{sinc}(\omega\pi/d)|. \quad (11)$$

由(11)式可以看出, 最终的滤波器输出表达式中不含有相对位移 a , 即滤波器不再受图像和滤波器之间相对位移的影响, 只要地面目标满足随机过程, 且包含一定的高频成分, 此种滤波器形式就可作为检焦判据。

2.3 新型滤波器的构建

在 CCD 接收到的图像上模拟空间滤波器的构建, 利用隔行采样对采集到的图像进行处理, 以此来对多狭缝空间滤波器的周期性透射作用进行模拟, 从而代替光栅等物理形式的滤波器以简化系统结构。

如图 3 所示, x 和 y 方向分别是图像的行和列, 对 CCD 图像隔两行进行 N 次累加, 所形成的等效

空间滤波器的个数为 N , 狭缝高度为 h , 空间周期为 d , 通过改变每次累加间隔的行数和累加的次数可

以灵活地调整空间滤波器的空间周期和刻线个数, 这是物理空间滤波器所不具备的。

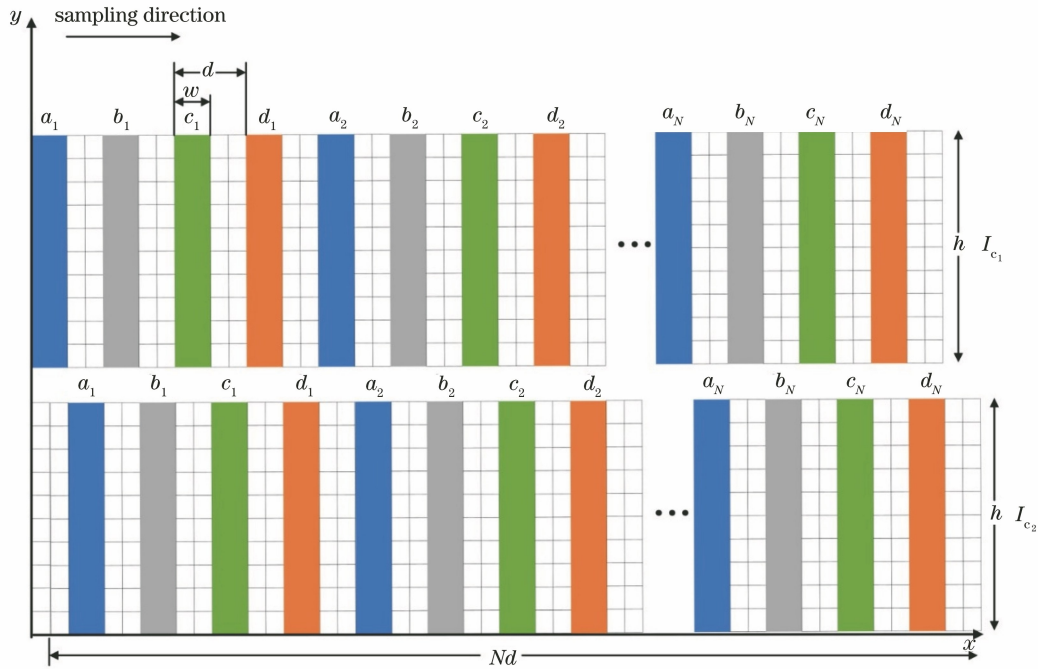


图 3 利用隔行采样模拟空间滤波器的过程

Fig. 3 Process of using interlaced sampling to simulate spatial filter

具体实现方法如下。首先, 从图像的第一列开始, 将 w 宽度范围内的灰度值相加得到 a_1 , 隔 w 宽度后, 再与下一个 w 宽度范围内的灰度值相加得到 b_1 , 进行同样的操作可得到 c_1 和 d_1 。在进行 N 次累加处理后, 可以得到 $a_1 \sim a_N, b_1 \sim b_N, c_1 \sim c_N, d_1 \sim d_N$, 此时可得到第一次采样的滤波器输出

$$I_{c_1} = \sqrt{(A - C)^2 + (B - D)^2} = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N a_n - \sum_{n=1}^N c_n\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N b_n - \sum_{n=1}^N d_n\right)^2}, \quad (12)$$

式中: $A = \sum_{n=1}^N a_n; B = \sum_{n=1}^N b_n; C = \sum_{n=1}^N c_n; D = \sum_{n=1}^N d_n$ 。

然后, 从图像的第二列开始, 用相同的方法可得到 k 次采样值 $I_{c_2}, I_{c_3}, \dots, I_{c_k}$, 再对其取均方根值, 可得到此图像对应的滤波器输出

$$I_{cp1} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{m=1}^k I_{c_m}^2}. \quad (13)$$

利用上述方法对多幅图像进行计算, 最终可以得到每张图像对应的滤波器输出, 将此输出作为检焦评价函数来绘制检焦曲线。依据检焦曲线确定相机的最佳焦面位置后, 即可完成检焦。

3 实验结果与分析

为了验证基于新型滤波器的检焦方法的效果,

进行了成像实验。在实验中, CCD 探测器和镜头被固定在精密导轨上, 导轨安装在单轴电子转台上。通过转台以 0.01 rad/s 的角速度带动镜头旋转的方式, 对航空相机在 5 mm/s 像移速度下的飞行成像过程进行了模拟。同时, 利用步进电机调整精密导轨上 CCD 的位置, 模拟了相机飞行中的离焦过程。最终, 将采集到的图像传入计算机, 并利用算法模拟新型滤波器的处理过程, 采集输出信号后便可绘制出检焦曲线。

在实验中, 所使用的镜头的焦距为 200 mm , F 数为 8 , CCD 像元尺寸为 $8 \mu\text{m}$, 步进电机的步长为 $2.5 \mu\text{m}$, 光学系统的半焦深为 Δ 。半焦深的表达式为

$$\Delta = 2F^2\lambda, \quad (14)$$

式中: λ 为入射光的波长, 其值为 $0.6 \mu\text{m}$, 此时系统的半焦深为 $76.8 \mu\text{m}$ 。只有检焦搜索的间隔在半焦深以内, 才可以保证结果的准确性。在本次实验中, 将 CCD 在导轨上的移动间距设置为 $40 \mu\text{m}$, 在焦面附近 $400 \mu\text{m}$ 范围内进行检焦搜索, 共采集了 11 幅图像, 其中处在标定焦面位置的图像如图 4 所示。分别采用传统的 Robert、Sobel、Laplacian 算法与所提算法对图 4 所示的图像进行了计算, 最终的得到检焦曲线如图 5 所示。



图 4 标定焦面位置处的图像

Fig. 4 Image at the calibrated focal plane position

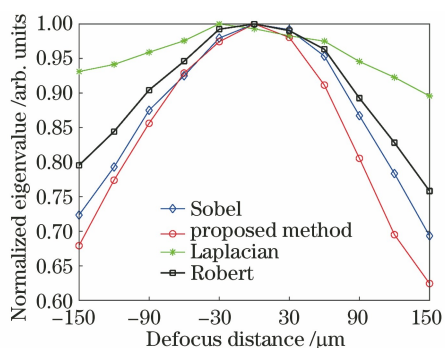


图 5 不同评价函数检焦曲线的对比

Fig. 5 Comparison of focal curves of different evaluation functions

在图 5 中,横轴代表与标准焦面的距离(即离焦量),纵轴代表进行了归一化处理后的评价函数值。可以发现,相比实验所用的其他算法,所提方法的函数值随离焦量的变化最为敏锐,具有更高的检焦精度与灵敏度。

为了验证所提方法的重复性精度,根据转台转速 ω 和实际像移速度 v 的关系,即 $v = \omega \times f_1$,其中 f_1 为镜头焦距,计算并设置转台速度为典型速高比下像移速度(5.00~53.20 mm/s)所对应的转台转速(0.025~0.266 rad/s)。随后,连续进行 25 次检焦,并计算所提算法的误差均方根值(RMS),最终结果如表 1 所示。同时,在 53.2 mm/s 像移速度下计算了所提算法与其他检焦算法的误差均方根值,

最终比较结果如表 2 所示。

表 1 重复性精度测量结果

Table 1 Measurement results of repeatability accuracy

Angular velocity of turntable / ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	Velocity of image motion / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	RMS of measurement error / μm
0.025	5.00	6.57
0.078	15.50	10.68
0.142	28.34	14.24
0.182	36.42	23.46
0.212	42.50	29.15
0.266	53.20	41.16

表 2 4 种评价函数的检焦精度

Table 2 Focusing accuracies of four evaluation functions

Image focusing method	Focusing accuracy / μm
Proposed method	41.16
Sobel	47.32
Robert	49.52
Laplacian	52.83

由表 1 可知,随着飞行移动速度的不断增大,测量结果的误差均方根值也在不断增大,原因是飞行速度的增大引起图像像移速度增大,图像质量下降,进而测量误差增大^[17]。表 1 中最大的测量误差均方根值为 41.16 μm ,其值小于实验中检焦系统的半焦深(76.8 μm),符合检焦系统的精度要求。从表 2 中可以看出,所提算法的精度明显优于传统的检焦

算法,与其中检焦精度最高的 Sobel 算法相比,精度提高了约 13%,具有较好的检焦效果。

同时,为了验证所提方法在航空相机实际飞行过程中的检焦效果,使用所提算法对航空相机实际

运动中拍摄的图像进行了处理,检焦前后的图像如图 6 所示。在典型像移速度(53.2 mm/s)的情况下,经过计算得到其检焦误差为 $43.28 \mu\text{m}$,符合检焦精度要求,表明其具备一定的实用性。

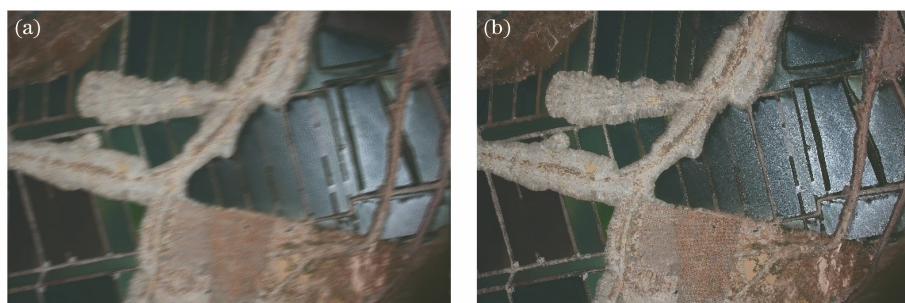


图 6 航拍图像调焦前后结果对比。(a)调焦前;(b)调焦后

Fig. 6 Comparison of aerial images before and after focusing . (a) Before focusing; (b) after focusing

4 结 论

随着航空相机作用的日渐凸显,自动检焦技术作为相机获得清晰图像的关键,显得尤为重要。基于空间滤波效应设计了一种新型滤波器,并将其输出信号作为检焦评价函数,消除了滤波器和图像间相对位移的影响。同时,在 $0.025 \sim 0.266 \text{ rad/s}$ 的转台速度下进行了 25 次检焦实验,最终结果显示,与传统的检焦算法相比,基于新型滤波器的检焦方法的检焦精度约提升了 13%,具有更高的检焦精度。实验中最大的检焦误差均方根值为 $41.16 \mu\text{m}$,小于实验中所用系统的最大允许误差($76.8 \mu\text{m}$),表明该方法能够应用于航空相机的焦面检测,具备一定的实用性。

参 考 文 献

- [1] Lü H, Han C S, Xue X C, et al. Autofocus method for scanning remote sensing cameras [J]. Applied Optics, 2015, 54(20): 6351-6359.
- [2] Meng F H. Study on the application of autofocus technique based on image processing technology in aerial camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 1-3.
孟繁浩. 基于图像处理的自动检焦技术在航空相机中的应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016: 1-3.
- [3] Ye Y Q, Yi D R, Zhang Y Z, et al. Microscopy autofocus method using tilt camera [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1218001.
叶一青, 易定容, 张勇贞, 等. 基于倾斜摄像头的显微自动对焦方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1218001.
- [4] Lu P L. Study on auto-focusing methods based on image processing technology [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 18-22.
路朋罗. 基于图像处理技术的自动调焦方法研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016: 18-22.
- [5] Shi L, Jin G, Tian H Y, et al. Autofocusing 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.
- [6] Zhao Z B, Liu J H. Power spectra-based autofocus 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.
- [7] Zheng L N, Li Y W, Yuan G Q, et al. Automatic focus plane detection of aerial remote camera based on Visibility [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(4): 0417001.
郑丽娜, 李延伟, 远国勤, 等. Visibility 的航空遥感相机自动焦面检测方法 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0417001.
- [8] Li Q H, Ding Y L, Xiu J H, et al. Self-collimation inspection and focusing method based on image processing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 021104.
李启辉, 丁亚林, 修吉宏, 等. 基于图像处理的自准直检焦方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 021104.
- [9] Yan Z D, Chen G, Xu W Y, et al. Study of an image autofocus method based on power threshold function

- wavelet reconstruction and a quality evaluation algorithm[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(33): 9714-9721.
- [10] Hong Y Z, Ren G Q, Sun J. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3401-3408.
洪裕珍, 任国强, 孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3401-3408.
- [11] Zheng L N, Kuang H P, Li W M, et al. Method of pedestal component elimination based on line CCD for spatial-filter velocimetry signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0211001.
郑丽娜, 匡海鹏, 李文明, 等. 基于线阵 CCD 的空间滤波测速信号基频消除方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0211001.
- [12] Kang Q. Research on automatic inspection and focusing system of aerial camera based on spatial filtering effect[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021: 23-27.
康琦. 基于空间滤波效应的航空相机自动检调焦系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021: 23-27.
- [13] Christofori K, Michel K. Velocimetry with spatial filters based on sensor arrays[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1996, 7(3/4): 265-272.
- [14] Sun Y B, Zhou J M, Chen S S, et al. Signal processing for extracting velocity information from spatial filtering signals [C] // 2020 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), October 29-30, 2020, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2020: 379-383.
- [15] Kang Q, Zheng L N, Wang H J. Aerial camera image focusing method based on out-of-phase differential filtering effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20200432.
康琦, 郑丽娜, 王海江. 异相差分滤波效应的航空相机图像检焦方法[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(8): 20200432.
- [16] Oppenheim A V, Willsky A S, Nawab S H. *Signals and systems*[M]. 2nd ed. Liu S T, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2013: 336-339.
艾伦·V·奥本海姆, 艾伦·S·维爾斯基, S·哈米德·纳瓦布. 信号与系统[M]. 第二版. 刘树棠, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013: 336-339.
- [17] Meng F H, Ding Y L, Wang D J, et al. Analysis of influence of image motion on auto-focus precision for high resolution aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0611001.
孟繁浩, 丁亚林, 王德江, 等. 像移对长焦距高分辨率航空相机检调焦精度影响的分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0611001.