

像移对长焦距高分辨率航空相机检调焦精度影响的分析

孟繁浩^{1,2} 丁亚林¹ 王德江¹ 修吉宏¹ 许永森¹ 马天翔¹ 孙崇尚^{1,2}

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

摘要 应用图像法对长焦距高分辨率航空相机实时检调焦过程中, 由于外界环境因素的影响使得系统产生像移, 调焦精度降低。当前对于由相对运动引起的像移和调焦精度两者之间关系没有通用性的理论和确切的研究。从理论上分析了高分辨率航空图像线性像移和抖动像移的模型, 给出了像移模型对评价函数的影响, 得到像移与调焦曲线极大值呈负相关的关系。图像的像移量越大, 调焦函数曲线的最大值下降越显著。利用二次函数拟合的方法获得离散评价函数点的拟合曲线, 曲线最高点即对应调焦的最优对焦位置。搭建了动基座检调焦实验平台, 实验结果表明当平台引起的图像像移量由 1 pixel 增加至 5 pixel 时, 评价函数曲线的最大值由 95.95% 下降到 87.64%。应用拟合曲线的方法得到的最佳对焦位置在系统半焦深范围之内, 满足高分辨率航空相机调焦精度的要求, 同时证明了像移理论分析的正确性。

关键词 成像系统; 航空相机; 像移; 检调焦精度; 曲线拟合

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0611001

Analysis of Influence of Image Motion on Auto-Focus Precision for High Resolution Aerial Camera

Meng Fanhao^{1,2} Ding Yalin¹ Wang Dejiang¹ Xiu Jihong¹
Xu Yongsen¹ Ma Tianxiang¹ Sun Chongshang^{1,2}

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In the use of real-time auto-focusing technology based on image processing of long range and high resolution aerial camera, the precision decreases due to the influence of image motion. Currently there is no universal theory and exact conclusion on the relationship between image motion and auto-focusing precision. The models of linear motion and jitter are analyzed theoretically, and the mathematical formulas illustrated the influence of image motion on auto-focusing measures are given. The image motion has a negative correlation to maximum value of focusing curve, the larger amounts of image motion, the smaller maximum value of the auto-focus measures. The best focusing position is located at the top of the fitting curve, by making use of the quadratic fitting technology to get auto-focusing curve. The motion base platform for auto-focusing is designed and set up. Experimental results show that when the image motion increases from 1 pixel to 5 pixel, the maximum value of curve decreases from 95.95% to 87.64%. At the same time, the best auto-focusing position on fitting curve is in the high resolution aerial camera's half depth of focus. This result proves the correctness of image motion theoretical analysis.

Key words imaging systems; aerial camera; image motion; auto-focusing precision; fitting curve

OCIS codes 110.2970; 040.1490; 100.2960; 120.0280; 280.4788

收稿日期: 2014-12-08; 收到修改稿日期: 2015-01-23

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: mengfanhao89@126.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.

1 引 言

图像实时检调焦技术在长焦距高分辨率航空相机成像过程中扮演着重要的角色。航空相机在飞行成像过程中受到环境因素的影响,系统产生离焦现象,使拍摄的图像质量下降,图像分辨率降低。因此,目前国内外先进的航空相机载荷上都配备有像移补偿系统。近年来,航空相机应用基于图像处理的检调焦方法引起了广泛的关注。在应用基于图像处理技术的检调焦方法时,检调焦系统根据相机拍摄的目标景物图像,利用图像处理技术检测相机的离焦量,驱动调焦系统实现实时调焦功能。该方法直接利用航空相机拍摄图像,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。近年来,基于图像处理的检调焦方法已成为航空相机自动检调焦技术的发展方向^[1-5]。

然而,航空相机应用基于图像处理的检调焦方法时,直接使用拍摄到的景物图像,因此该方法对系统的图像质量有较强的依赖性。当航空相机对地面景物拍摄成像时,成像系统受到平台不稳定的影响(如飞行器的姿态变化、抖动等),导致相机在对地面景物成像曝光时间内像平面与景物并没有完全静止,发生相对移动,图像产生像移^[6-8]。像移的存在使得高分辨率航空相机成像质量下降,甚至模糊不清,导致图像的分辨率降低^[9]。有像移的图像会导致应用基于图像处理的检调焦方法时,系统的调焦准确率降低。因此像移对高分辨率的航空图像实时检调焦技术的影响不可忽略。研究航空相机像移的存在对航空相机实时检调焦技术的影响有重要的意义。

航空相机应用基于图像处理的检调焦方法时,系统采用面阵、高帧频成像模式。像移的影响使得成像平面上两次拍摄景物的图像并不完全相同,有微小的位移存在。在利用图像信息调焦之前,先用配准算法对两幅图像配准并选择配准后图像中重叠的区域^[10-11]。图像配准后,两幅图像的配准精度达到亚像素级。利用配准后的图像计算评价函数值,并用二次曲线拟合的方法找到拟合曲线的最大值位置,即为对焦最佳点。这种方法可以使调焦准确率更高,所得的评价函数曲线能够正确表示最佳对焦位置。

航空相机在应用基于图像处理技术的自动检调焦方法时,应用的图像为相机直接拍摄的带有像移的图像。而在目前的相关文献中提出的基于图像处理技术的调焦方法都是针对于静止的清晰图像或没有像移时的图像,而对有像移时的图像调焦技术尚无研究。

本文提出对有像移的图像应用图像法调焦技术,建立图像调焦方法的频率域评价函数模型,从理论上分析线性像移和抖动像移对评价函数的影响,通过对评价函数差值的分析得到像移对调焦准确性的影响。利用二次函数拟合的方法降低图像像移对调焦精度的影响,得到的最佳对焦位置在系统的半焦深范围内,能够满足高分辨率航空相机调焦精度的要求。同时,对像移图像调焦的研究在图像调焦领域具有重要意义。

2 像移对评价函数的影响

2.1 图像调焦评价函数模型

通常认为,一幅聚焦良好的图像包含有更清晰的边缘和细节信息。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^[12-13]。图像的边缘和细节信息经过频域变换后成为频谱中的高频部分。如果变换后的频谱图像中包含更多的高频分量,则说明图像本身具有更清晰的边缘和细节。因此可以通过检测图像的傅里叶变换频谱中的高频信息是否丰富来判断图像的清晰度。假设一幅图像表示为 $f(x,y)$,则图像的调焦评价函数可以表示为

$$F_M = \sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} F(\xi, \eta), \quad (1)$$

式中 $F(\xi, \eta) = \mathcal{F}\{f(x,y)\}$, 区间 (ξ_1, ξ_2) 表示频谱中的高频分量区间。

2.2 线性像移对评价函数的影响

当景物和像平面之间匀速运动时图像上产生线性像移,线性像移是最简单的像移模型。假设像移方向为 x 轴方向,在曝光时间 t_{exp} 内,景物和相机像平面的相对运动速度为 v ,则像移量表示为

$$d_{\text{motion}} = vt_{\text{exp}}. \quad (2)$$

在分析图像像移对调焦的影响时,垂直于成像平面的 z 轴方向上也会产生像移,并对成像造成影响。如

果控制精度不高, z 轴方向上的像移会引起像面和景物之间距离的变化, 导致成像的放大倍率改变, 同时距离的变化还会造成图像离焦程度的不同。对于长焦距航空相机来说, 相机成像距离远, z 轴方向上像移的影响非常小, 忽略不计^[14]。因此, 通常只考虑在 x - y 平面上的像移量而忽略在 z 轴方向上的像移。

线性像移只在移动方向上使图像产生拖尾效应, 而在垂直移动方向上对图像分辨率没有影响。线性像移的模型可以看作是图像在像移方向上与矩形函数的卷积^[15]

$$g_{\text{motion}}(x, y) = f(x, y) \cdot h_{\text{motion}}(x, y), \quad (3)$$

其中,

$$h_{\text{motion}}(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{d_{\text{motion}}}\right) = \begin{cases} 1, & |x| < \frac{d_{\text{motion}}}{2} \\ 1/2, & |x| = \frac{d_{\text{motion}}}{2} \\ 0, & |x| > \frac{d_{\text{motion}}}{2} \end{cases}. \quad (4)$$

当系统存在线性像移时, 利用图像法对系统进行调焦, 通过计算拍摄到的一组图像的评价函数值, 得到这组图像的调焦评价函数曲线, 曲线的最高点对应的位置即为图像对焦最佳点。为了计算图像的评价函数曲线, 选择图像傅里叶变换后频谱中的高频分量作为评价函数^[16-17], 计算有像移图像 $g_{\text{motion}}(x, y)$ 的傅里叶变换, 得到

$$G_{\text{motion}}(\xi, \eta) = F(\xi, \eta) \cdot H_{\text{motion}}(\xi, \eta), \quad (5)$$

式中矩形函数 $h_{\text{motion}}(x, y)$ 的傅里叶变换函数为 sinc 函数

$$H_{\text{motion}}(\xi, \eta) = \mathcal{F}\{h_{\text{motion}}(x, y)\} = \text{sinc}(d_{\text{motion}} \xi). \quad (6)$$

对于线性像移, 像移量只在一维方向上, 因此, $H_{\text{motion}}(\xi, \eta)$ 可以简化为 $H_{\text{motion}}(\xi)$ 。有像移的图像经过傅里叶变换后频谱中频率分量与无像移图像的频率相同, 但频谱中增加了 $H_{\text{motion}}(\xi)$ 函数项, 频率的权重改变了。 $H_{\text{motion}}(\xi)$ 函数的曲线图如图 1 所示。图像经过傅里叶变换后频谱分量不变, 但每个频率分量都乘以 $\text{sinc}(d_{\text{motion}} \xi)$ 函数。由函数曲线图 2 可知, 频率值越大的 $\text{sinc}(d_{\text{motion}} \xi)$ 函数曲线下降越快, 频谱中的高频分量与 $\text{sinc}(d_{\text{motion}} \xi)$ 函数相乘后下降的更明显。 $\text{sinc}(d_{\text{motion}} \xi)$ 函数只与像移量 d_{motion} 相关, 对于有相同像移的图像, 图像质量下降的程度相同, 利用图像法调焦时, 高频分量虽然有下降, 但并不影响图像的整体调焦结果。

2.3 抖动像移对评价函数的影响

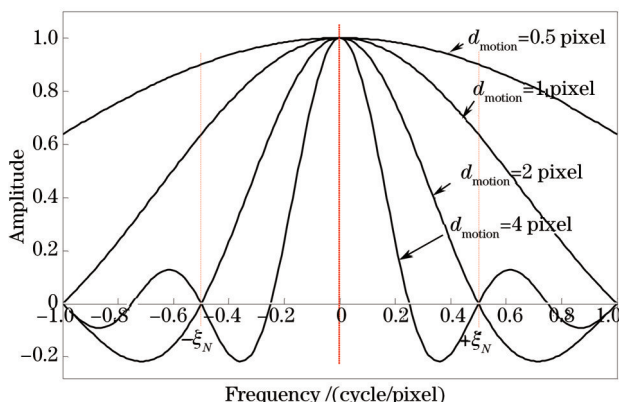


图 1 sinc 函数曲线图

Fig.1 Curves of sinc function

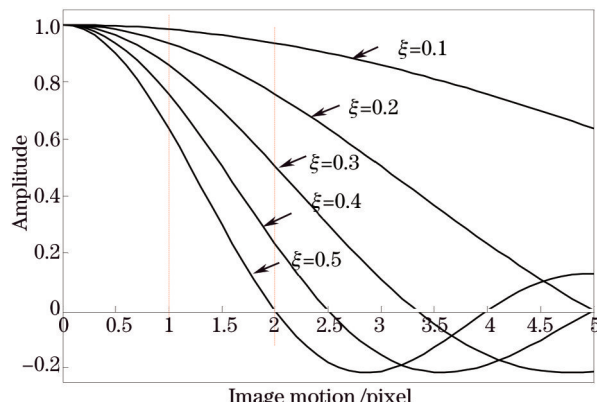


图 2 不同频率 sinc 函数与像移量变化曲线图

Fig.2 Curves of sinc function at different frequencies with image motion

在曝光时间内, 相机的像平面和景物之间产生快速随机移动, 此时图像产生抖动像移。抖动使图像产生模糊现象, 与线性像移不同, 抖动使图像在各方向上都有像移。图像产生抖动像移时可以表示为无像移图像 $f(x, y)$ 与高斯函数的卷积^[13]

$$g_{\text{motion}}(x, y) = f(x, y) \cdot h_{\text{motion}}(r) = f(x, y) \cdot \frac{1}{\sigma_{\text{motion}} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_{\text{motion}}^2}\right], \quad (7)$$

式中 σ_{motion} 为抖动像移量的标准偏差。

当系统有抖动像移时,利用图像法对相机进行调焦,根据拍摄的一组图像计算调焦评价函数曲线。对有抖动像移的图像做傅里叶变换,提取图像中的高频分量部分作为图像法调焦的评价函数。图像傅里叶变换后只考虑图像的频率分量,变换结果为

$$G_{\text{motion}}(\xi) = F(\xi) \cdot H(\xi), \quad (8)$$

其中高斯函数的傅里叶变换为

$$H_{\text{motion}}(\xi) = \mathcal{F}(h_{\text{motion}}) = \exp[-2(\pi\sigma_{\text{motion}}\xi)^2].$$

从(8)式可以看出,有抖动像移的图像经过傅里叶变换后,频谱与无像移图像的频谱相比频率分量不改变,但都乘以了相应频率的高斯函数项。不同像移量的高斯函数曲线如图3所示。

图4为不同频率下高斯函数与像移量的关系图,可以看出,像移量越大,高斯函数值下降越明显。与频谱相乘后,频谱中不同频率的分量权重改变了。当一组图像的像移量相同时,相同像移量的图像高斯函数也相同,相乘后图像的调焦结果不改变。因此,当相机存在抖动像移时也可以使用图像法进行调焦,调焦结果理论上与无像移时一致。

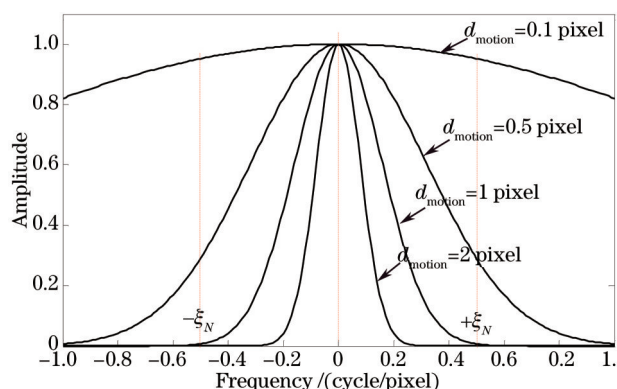


图3 高斯函数曲线图

Fig.3 Curves of Gaussian function

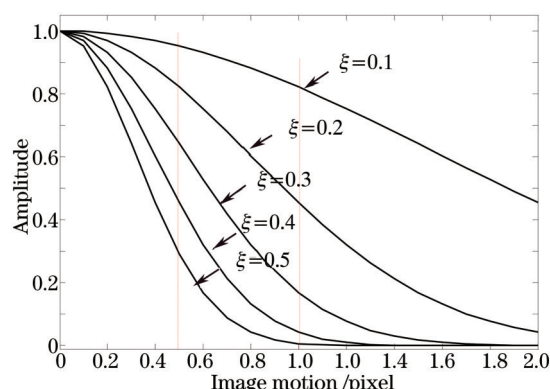


图4 不同频率高斯函数与像移量变化曲线图

Fig.4 Curves of Gaussian function at different frequencies with image motion

3 像移对图像调焦精度分析

航空相机应用基于图像处理技术的调焦方法时,系统焦平面的不同位置对应相机的离焦量不同,评价函数值也不同,针对拍摄的图像计算评价函数值并画出评价函数曲线图。选择图像傅里叶变换后频谱中的高频分量信息作为评价函数,函数曲线上两点之间的差值表示两幅图像清晰度的差异。当系统无像移时,两幅图像评价函数差值 Δ 表示为

$$\Delta = \sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} F_2(\xi) - \sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} F_1(\xi), \quad (9)$$

式中 $F_n(\xi)$ 表示图像傅里叶变换后的频率谱,区间 (ξ_1, ξ_2) 表示频谱中的高频分量区间。

当系统存在像移时,图像傅里叶变换后频谱中多了与像移有关项。假设系统的像移为线性像移,由对线性像移的分析可知,图像傅里叶变换后评价函数差值的结果为

$$\Delta' = \sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} F_2(\xi) \text{sinc}(d_{\text{motion}}^2 \xi) - \sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} F_1(\xi) \text{sinc}(d_{\text{motion}}^1 \xi), \quad (10)$$

式中 d_{motion}^1 , d_{motion}^2 分别表示不同图像的像移量。在(10)式中先减少再增加相同的一项等式结果不变

$$\Delta' = \left[\sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} F_2(\xi) \text{sinc}(d_{\text{motion}}^2 \xi) - \sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} F_1(\xi) \text{sinc}(d_{\text{motion}}^2 \xi) \right] + \left[\sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} F_1(\xi) \text{sinc}(d_{\text{motion}}^2 \xi) - \sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} F_1(\xi) \text{sinc}(d_{\text{motion}}^1 \xi) \right], \quad (11)$$

(11)式简化为

$$\Delta' = \sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} [F_2(\xi) - F_1(\xi)] \text{sinc}(d_{\text{motion}}^2 \xi) + \sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} F_1(\xi) [\text{sinc}(d_{\text{motion}}^2 \xi) - \text{sinc}(d_{\text{motion}}^1 \xi)], \quad (12)$$

当两幅图像的像移量相同时,即 $d_{\text{motion}}^1 = d_{\text{motion}}^2$, 则(12)式中第二项的函数值为零,可简化为

$$\Delta' = \sum_{\xi=\xi_1}^{\xi_2} [F_2(\xi) - F_1(\xi)] \text{sinc}(d_{\text{motion}} \xi), \quad (13)$$

此时图像法调焦评价函数差值的结果与无像移时相比,只是多了 $\text{sinc}(d_{\text{motion}} \xi)$ 函数项,该项的影响使得频谱中的频率分量被削减了,评价函数值的差变小,评价函数曲线变得平滑,但曲线的峰值位置不改变,因此并不影响最终调焦结果,如图5所示。

当两幅图像的像移量不相同时,则(12)式中第二项的值不为零,该项的大小不仅与两幅图像的离焦量有关,还与图像的像移量相关。当两幅图像的像移量相差较大时,(12)式中第二项的值也较大,对评价函数差值的影响也越大,图像法调焦结果不准确。如果两幅图像的像移量接近,如在某一像移量值较小范围内上下波动(如 $\pm 5\%$),则在频率范围内 $\text{sinc}(d_{\text{motion}}^2 \xi)$ 与 $\text{sinc}(d_{\text{motion}}^1 \xi)$ 的差值如图6中阴影部分所示。阴影部分面积越小,则对评价函数差值的影响越不显著,此时的调焦结果愈加接近图像像移相同时的调焦结果。

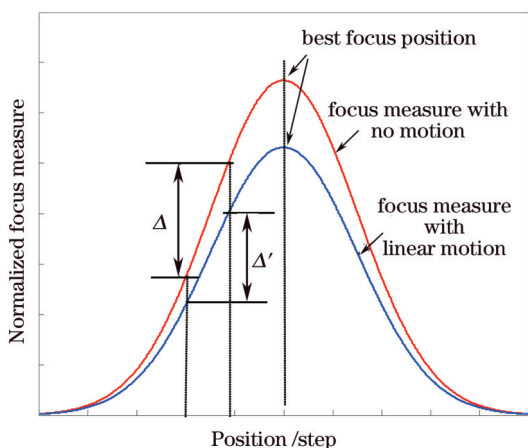


图5 像移图像评价函数曲线图

Fig.5 Curves of motion images evaluation function

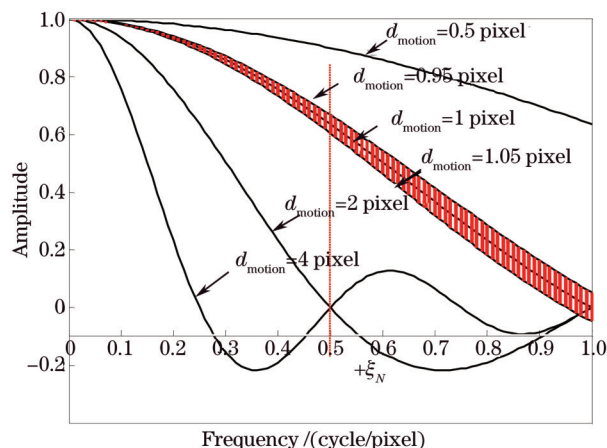


图6 不同像移量 sinc 函数差值曲线

Fig.6 Curves of sinc function on different amounts of image motion

当图像中有其他类型的像移(如抖动像移)时,图像的评价函数差值结果分析与线性像移相同,只是用其他类型的像移模糊函数替代 sinc 函数,分析得到的结果与结论与线性像移时相同,此时系统仍然可以采用图像法调焦技术进行调焦。

4 实验结果

为了验证图像像移对图像调焦结果的影响,设计了实验原理图如图7所示。将镜头、互补金属氧化物半导体(CMOS)相机和平行导轨组成的相机调焦系统放置在水平精密转台上,精密转台带动调焦系统在水平方向上转动,用以模拟航空相机在成像过程中产生的水平像移。转台水平摆动过程中,相机与镜头组成的成像系统对景物靶标成像。步进电机驱动相机在平行导轨上光轴方向前后移动,调整焦面位置实现相机的自动对焦过程。水平精密转台的转动速度不同,成像系统像平面上像移量的大小也不相同。实验装置图如图8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。

实验中相机镜头焦距为 $f=200 \text{ mm}$, 镜头 F 数为 5.6, 成像探测器的像元尺寸为 $5.6 \mu\text{m}$ 。控制水平转台的转动速度,调节像平面和景物靶标之间的相对移动速度,使得图像的像移量分别为 1, 3, 5 pixel。靶标图像如图9所示:当成像平面上没有像移和分别有 1, 3, 5 pixel 像移时,对像移图像做傅里叶变换将图像由空域变换到频率域。选择频率变换后图像中的高频分量信息作为图像法调焦的评价函数,分别画出没有像移的图像和图像上有 1, 3, 5 pixel 像移时图像调焦评价函数曲线图。如图10所示。

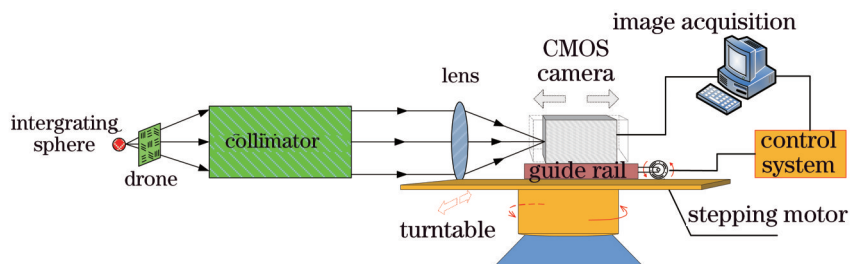


图 7 实验原理图

Fig.7 Sketch of experimental setup

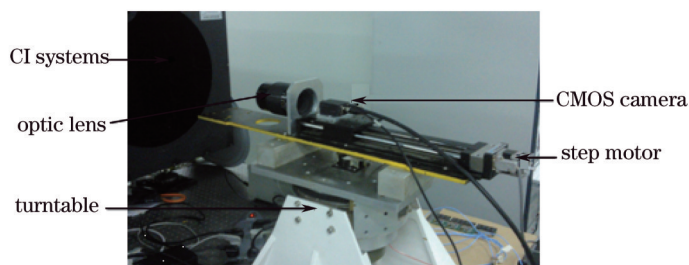


图 8 实验装置图

Fig.8 Schematic diagram of experimental setup

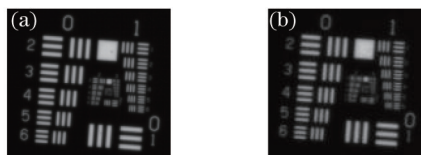


图 9 拍摄靶标图像。(a)无像移图像; (b)5 pixel 像移图像

Fig.9 Collected target images. (a) No linear motion; (b) 5 pixel linear motion

当图像中有线性像移时,图像的评价函数值会受到像移的影响而降低,使得评价函数曲线整体降低。图像中的像移量越大,评价函数值下降的越明显。利用评价函数的离散值求得拟合的二次函数曲线,拟合曲线的最高点即对应最佳对焦位置。利用拟合曲线的方法可以有效抑制噪声的影响,减弱因某次测量时随机噪声的干扰和像移测量不准确而引入的误差。拟合曲线如图 11 所示。

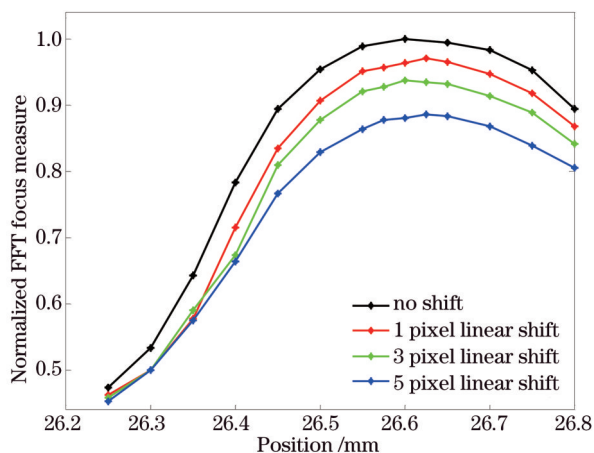


图 10 评价函数曲线图

Fig.10 Curves of evaluation function

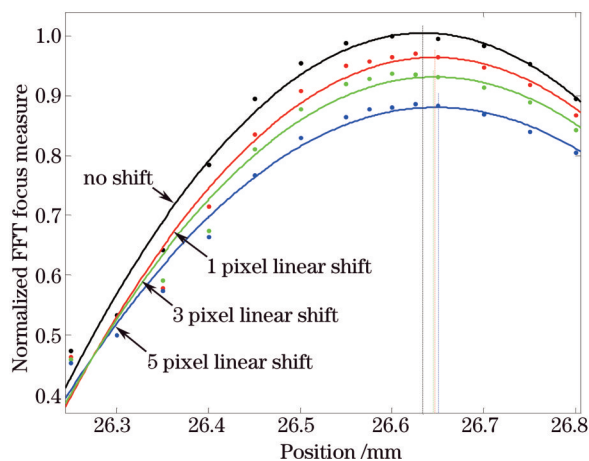


图 11 不同像移时评价函数的拟合曲线

Fig.11 Fitting curves of evaluation function on different image motions

如图 11 所示,当系统中无像移和分别存在 1,3,5 pixel 的线性像移时,评价函数曲线的最大值逐渐下降,用曲线最大值的下降程度表征图像像移的影响。根据评价函数的拟合曲线得到图像的最大值对应的最佳对焦位置,如表 1 所示。

表 1 不同像移对焦位置对比

Table 1 Auto-focusing position of different image motions

Image motion /pixel	Best focus position /mm	Distance apart from no shift position /mm	Percentage of maximum /%
0	26.6340	0	1
1	26.6460	0.0120	95.95
3	26.6465	0.0125	92.71
5	26.6480	0.0140	87.64

实验使用的相机系统镜头 F 数为 5.6, 航空相机半焦深计算公式为

$$\delta = \frac{\Delta}{2} = 2F^2 \lambda = 2 \times 5.6^2 \times 0.55 = 0.0345. \quad (12)$$

表 1 中像移图像的拟合曲线最大值位置与无像移曲线最佳位置的距离均小于相机系统的半焦深, 表明利用二次函数曲线拟合的方法得到的最佳对焦位置, 满足航空相机调焦精度的要求。

5 结 论

针对航空相机在拍摄图像过程中存在像移的情况, 分析了系统像移对图像法调焦精度的影响。通过分析建立的系统线性像移和抖动像移的模型, 从理论上分析存在像移时对调焦评价函数的影响。系统像移量越大, 评价函数曲线下落越明显。当系统中有 5 pixel 的线性像移时, 评价函数曲线最大值下降为无像移时曲线最大值的 87.64%。通过二次函数曲线拟合的方法得到的系统最佳对焦位置在系统的半焦深范围内, 表明利用拟合曲线的方法找到调焦最佳位置可以用来调焦, 并且满足航空相机的调焦精度的要求。

参 考 文 献

- 1 Chen Fang, Zhang Cunji, Han Yanxiang, *et al.*. Fast focus on simple images[J]. Optics 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.
- 2 Y Yao, B Abidi, N Doggaz, *et al.*. Evaluation of sharpness measures and search algorithms for the autofocusing of high magnification images[J]. SPIE, 2006, 6246: 62460G.
- 3 Wang Dejiang, Li Wenming, Xu Yongsan, *et al.*. A fast auto-focusing technique for the TDI-CCD panoramic aerial camera[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2012, 23(8): 1452-1457.
王德江, 李文明, 徐永森, 等. TDI-CCD 全景航空相机快速自动调焦方法[J]. 光电子激光, 2012, 23(8): 1452-1457.
- 4 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.
- 5 Y Kang, X Tu, S Dutta, *et al.*. Robust Depth-from-defocus for autofocusing in the presence of image shifts[C]. SPIE, 2008, 7066: (706609).
- 6 Sun Hui, Zhang Shumei. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2492-2499.
孙 辉, 张淑梅. 机载成像系统像移计算模型与误差分析[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(11): 2492-2499.
- 7 Liu Zhiming, Zhu Ming, Chen Li, *et al.*. Long range analysis and compensation of smear in sweep aerial remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0711001.
刘志明, 朱 明, 陈 黎, 等. 长焦距全景式航空遥感器像拖影分析及补偿抑制方法[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711001.
- 8 Zheng Lina, Zhang Tao, Kuang Haipeng, *et al.*. Image motion velocity measurement technique based on spatial filtering effect of line CCD for aerial camera[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112002.
郑丽娜, 张 涛, 匡海鹏, 等. 基于线阵 CCD 空间滤波效应的航空相机像移速度测量方法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112002.
- 9 Li Yanwei, Yuan Guoqin. Accuracy analysis of forward image displacement compensation device for aerial scan color CCD camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2439-2443.
李延伟, 远国勤. 面阵彩色航空遥感相机前向像移补偿机构精度分析[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(11): 2439-2443.
- 10 X Meng, H Feng, Z Xu, *et al.*. A Method of autofocus for remote sensing camera[C]. SPIE, 2010, 7813: 1-12.
- 11 Meng Xixi. Autofocus of Remote Sensing Camera Based on Image Registration[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
孟希羲. 基于图像配准的空间相机自动对焦[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

- 12 Meng Fanhao, Ding Yalin, Wang Dejiang, *et al.*. Analysis influence of signal to noise ratio on auto-focusing precision of aerial camera[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911001.
孟繁浩, 丁亚林, 王德江, 等. 信噪比对航空相机调焦精度的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0911001.
- 13 Zhou Liping, Sun Zhijun, Zhang Quan. Auto focusing and control of micro-vision system[J]. Optics 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.
- 14 Li Weixiong. Research on Method of Image Motion Compensation of Space High Resolution Camera' Collecting Scene Agilely [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
李伟雄. 高分辨率空间相机敏捷成像的像移补偿方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- 15 K J Held, B H Robinson. TIER II plus airborne EO sensor LOS control and image geolocation[C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 1997, 2, 377-405.
- 16 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.
- 17 Wang Xin, Wang Haixia, Xu Shuyan, *et al.*. Study on automatic focusing technique for remote sensing camera[J]. Optical Technique, 2006, 32: 344-347.
王 昕, 王海霞, 徐抒岩, 等. 遥感相机自动检焦技术研究[J]. 光学技术, 2006, 32: 344-347.

栏目编辑: 苏 岑