

文章编号 1004-924X(2008)12-2460-05

航空相机的自准直自动检焦方法研究

史磊^{1,2}, 金光¹, 田海英¹, 陈志超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 130031;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对航空照相在高空会由于温度、气压等环境参数的变化引起光学系统离焦的现象,设计了一种利用自准直原理实现自动检焦的结构。分析了光栅常数与反射镜摆扫速率、接收元件响应时间的关系,研究了光栅的刻线方向在焦平面上的摆放位置和不同光源参数对检焦精度的影响。试验结果表明,自动检焦的焦平面位置与实验室光学标定的焦平面位置的偏差 $<1/3$ 半焦深,满足使用要求,并在动态飞行试验中获得了良好的图像。该方法可推广于带有扫描反射镜的航空相机的检焦设计与研究中。

关键词:航空相机;自准直;自动检焦

中图分类号:V475.3;V216.8 **文献标识码:**A

Autofocusing method with automatic calibration for aerial camera

SHI Lei^{1,2}, JIN Guang¹, TIAN Hai-ying¹, CHEN Zhi-chao¹

(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: For the defocusing phenomenon caused by the changes of temperature, pressure and other environment parameters in optical system for a aerial camera in the air, an autofocusing method with automatic calibration was introduced, and the relationships of grating constant, the whiskbroom velocity of reflector and the response time of received component were analyzed, The effect of the position of grating direction on focal plane and the difference of light-house performance on calibration precision was researched. Experimental results indicate that the focal plane position tested by proposed autofocusing method is close to that tested by other automatic calibration methods in lab, the error is less than $1/3$ half focal depth(0.05 mm). A vivid image has been acquired in dynamic imaging test, which shows proposed method can be used in autofocusing for various aerial cameras with scanning mirror.

Key words: aerial camera; automatic calibration; autofocusing

1 引 言

实时精确的自动检调焦技术在现代航空摄影中非常关键。航空摄像中物距远远大于像距,所以可以近似地认为景物成像在相机的焦平面上。高空中温度、气压等环境参数的变化会引起相机镜头各个零部件的微小变形,使相机镜头的焦距偏离在地面所标定的像面位置,当偏离量大于整个相机光学系统的半倍焦深时,相机将无法拍摄出清晰图像。这时就需要相机的调焦系统利用检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上^[1-2]。

从原理上讲,在检焦过程中可以直接利用地面景物的对比度差别,由光电元件检测出离焦量,然而实际上由于地物景像的对比度通常比较低,要由光电元件检测离焦信号,常常是非常困难的。因此本文设计了一种利用相机内的高对比度的目标,应用自准直原理进行检焦的检焦方法。并详细分析了光栅常数与反射镜摆扫速率、接收元件响应时间的关系,研究了光栅的方向及其在焦平面上的摆放位置以及检焦光源的选择,并将这种方法应用于实际获取的高分辨率的图像^[3]。

2 自准直检焦的工作原理^[4]

图 1 所示为自准直检焦所用的高对比度光栅的示意图^[5]。

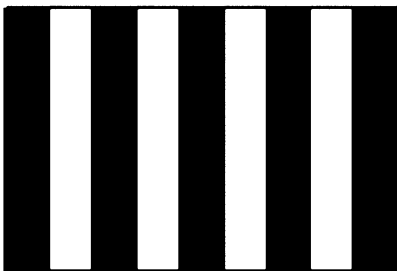


图 1 检焦所用光栅放大图

Fig. 1 Grating for autofocusing

图 2 为自准直检焦工作原理示意图:

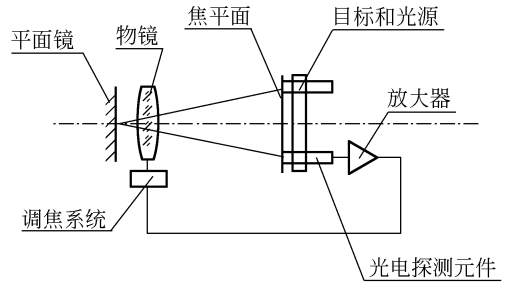


图 2 自准直检焦工作原理示意图

Fig. 2 Principle of autofocusing with automatic calibration

利用自准直检焦法自动检焦的前提条件是相机的镜头前面必须要有一个扫描平面镜。在自动检焦工作状态,扫描镜垂直竖起,并在垂直位置附近往复摆动。由发光二极管发出的光照亮位于镜头焦平面上的物方光栅。光线经过相机物镜及平面镜反射回来,再经过相机物镜成像在像方光栅,并在光敏二极管上产生一个光调制信号。当相机准确对焦时,由物方光栅经光学系统两次所成的物方光栅像和像方光栅重合,调制信号幅值最大,如图 3 所示。当相机离焦时,由物方光栅经光学系统两次所成的光栅像不和像方光栅重合,或在它的前面,或在它的后面。由于光源照亮物方光栅,这样物方光栅像就像一系列均匀排列的亮带呈现在像方光栅前(后),其调制信号幅值小于重合时的幅值,如图 4 所示^[6]。

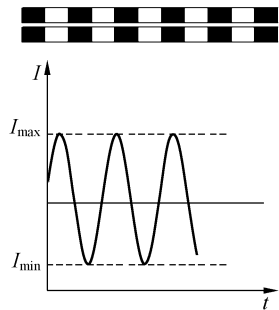


图 3 合焦时的调制信号图

Fig. 3 Modulated signal in focus superposition

图 5 为扫描平面镜在焦平面附近位置不停摆动检测时的波形图,其中峰值最大处所对应的位置即为检得的焦平面位置。

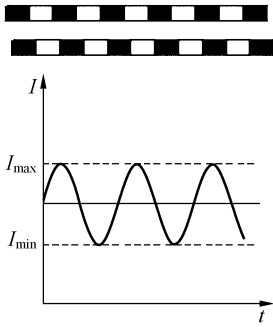


图 4 离焦时的调制信号图

Fig. 4 Modulated signal in defocusing

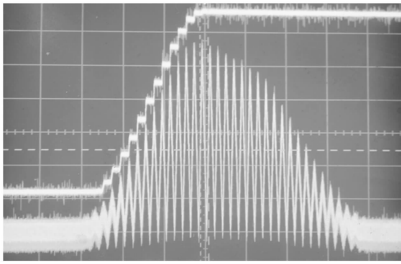


图 5 自准直检光调制信号波形图

Fig. 5 Modulated signal oscillogram with automatic calibration method

3 光栅常数与反射镜摆扫速率及接收元件响应时间的关系分析

航空相机检焦时一般选用缝宽 a 与缝间距 d (光栅常数) 相等的光栅, 并同时保证物方光栅的像成像在像方光栅上并上下摆扫, 从而产生调制信号, 原理如图 6 所示。

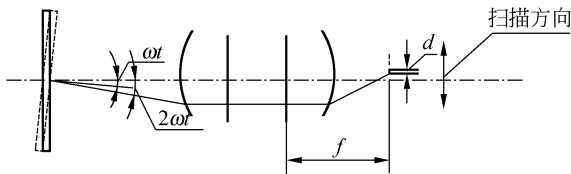


图 6 检焦摆扫过程示意图

Fig. 6 Process of autofocusing

由图 6 可以分析出, 要想准确测量光能的变化, 需要多次采样, 同时保证物方光栅像的一条光栅条纹移动一个光栅常数 d 的扫描时间 t 应当与

接收光敏元件的响应时间 t_m 相互匹配。

由图 6 可以看出, 扫描时间 t 与反射镜摆扫角速度 ω 、光栅常数 d 、相机镜头焦距 f 有关系:

$$t = \frac{\tan^{-1} d/f}{2\omega} \geq t_m. \quad (1)$$

因为通常情况下 $f \gg d$, 所以式(1)可以近似简化为:

$$t = d/2\omega f \geq t_m. \quad (2)$$

从式(2)中可以看出, 镜头的焦距 f 和反射镜摆扫角速度 ω 与扫描时间成反比, 光栅常数 d 与扫描时间成正比。提高检焦精度对实时测量相机的离焦量具有重要作用。因此, 在相同焦距的情况下尽量增大光栅常数 d , 减少反射镜摆扫角速度 ω 是提高检焦精度的有效途径。同时, 在保证精度的前提下应尽可能缩短检焦时间。

4 光栅方向与在焦平面上的摆放位置的讨论

由自准直检焦的原理可知, 要想获得变化的调制信号, 扫描反射镜需要在铅垂面附近小角度不停地往复摆动, 同时要求光栅条纹方向应垂直于反射镜摆扫时物方光栅像移动的方向。

光栅在焦平面上的摆放位置可以分以下两种情况, 一种是光栅放置在过光学系统焦平面的中心且平行于光栅像扫描方向的轴线上。如图 7 所示, 这种情况下物方光栅经光学系统、扫描反射镜自准直返回的像仍在该轴线上, 这样即可以用一个光栅完成检焦任务, 省略了像方光栅, 从而减少了很多误差环节, 在实际工程化过程中减少了加工装调的工作量, 是一种比较理想的检焦位置。但通常的光学系统, 焦平面中心附近位置是成像质量最好的区域, 一般都是用来放置胶片、CCD 等感光器件, 实际工程设计过程中很难把检焦系统排在图 7 的位置。当然可以通过棱镜进行分光来进行处理, 但实际工程化操作起来比较复杂, 因此, 可以采用另一种光栅摆放方法, 如图 8 所示。由几何光学知识可知, 焦平面上轴外点经光

学系统自准直回来的像,应该与其自身相对于光轴对称分布,因此物方光栅所成的像会在光轴的对称位置附近沿光栅条纹垂直方向上下摆动。所以,像方光栅应按照与物方光栅中心点对称的位置摆放,且光栅条纹方向与物方光栅条纹平行。

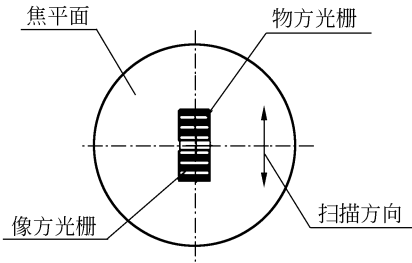


图 7 光栅放置位移图一
Fig. 7 Grating position 1

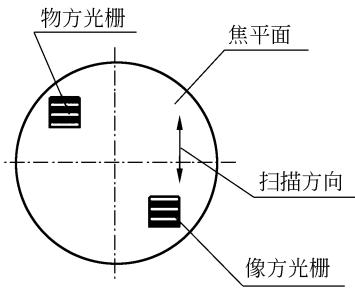


图 8 光栅放置位置图二
Fig. 8 Grating position 2

此外,由于光栅不是一个理想的平面,而是具有一定的几何尺寸的平板玻璃,因此其厚度会引起光程的变化,所以应尽量将光栅玻璃放置在不会引入检焦误差的位置。如果光栅与成像元件接收面同侧且光栅玻璃在光学系统光路的外侧,则应将光栅刻划面、成像元件感光面放置在同一个平面内;相反,如果光栅与成像元件不在接收面同侧,光栅玻璃在光路中会引起光程的变化,此时应将光栅刻划面与成像元件感光面错开一定距离放置,其距离为:

$$L = d(1 - \frac{1}{n}), \quad (3)$$

其中 n 为光栅的折射率, d 为光栅玻璃的厚度,如图 9 所示。

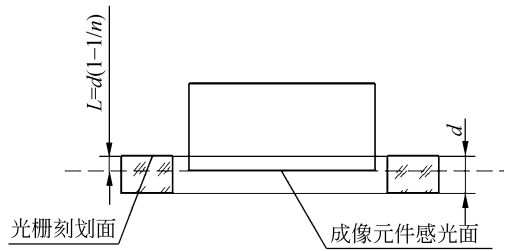
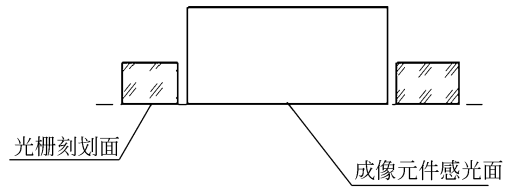


图 9 光栅的摆放方式

Fig. 9 Position of grating relative to optics

5 检焦光源的选择与光能计算^[7]

假设光源的亮度为 $B(\text{cm}/\text{m}^2)$, 由光照度公式可导出其在像面上所形成的照度 E' ,

$$E' = T\pi B \sin^2 U' \cos^4 U_p = \frac{T\pi B}{4} (\frac{D}{f})^2 \cos^4 U_p', \quad (4)$$

其中: D/f 为光学系统的相对孔径, U_p' 为视场角, T 为光学系统的总透过率。

由式(4)可以得出,当检焦光源在光轴上时, $\cos^4 U_p' = 1$, 而轴外视场的照度随轴外视场角的余弦的四次方而降低。当视场角很大时,像面照度降低就很严重,应根据光栅在焦平面上的放置位置选取适当的光源,并尽量将检焦光栅放置于接近相面中心的位置。此外光源在焦面上所形成的照度 E' 的大小应介于使光敏接收元件达到饱和输出的最大光强与使光敏接收元件刚好达到噪声水平的输出光强之间的范围之内,才能保证光敏接收元件正常工作。如果使用白光作为检焦光源,光线经过检焦光栅面时会产生色散现象,使得照射在接收元件感光面上的光线不均匀,影响检焦的效果,所以通常使用单色光来进行检焦。另外,由于单色光的波长不同,不同的单色光检焦所确定的位置也有微小的差异,所以,应选择与成像元件敏感波长相匹配的单色光进行检焦。

6 试验结果

将自准直检焦方法应用于焦距为 450 mm, F 数为 8, 成像光谱为 500~800 nm 的航空相机中, 相机允许的离焦误差是相机的半焦深 δ 。

$$\delta = 2F^2\lambda, \quad (5)$$

其中, λ 为相机成像的光谱范围。由半焦深的计算公式(5)得出相机的半焦深为 0.064 mm。

根据上述分析, 选取光栅常数为 0.1 mm, 扫描速度为 0.5 rad/s, 检焦光源采用谱段为 800 nm 的单色光发光二极管, 接收元件光谱为 400~950 nm, 峰值为 800 nm, 响应度 2.3×10^5 V/W 的光敏二极管进行多次自动检焦试验。在实验室自动检焦试验中, 编码器反馈的检焦位置与光学标定位置偏差为 0.012 mm, 满足所需使用要求。应用此检焦方法在相机动态飞行试验中获得了高分辨率的图像。

图 10 为动态飞行试验中 1:100 00 比例尺下经过自动检焦所成清晰图像。



图 10 动态成像试验图像

Fig. 10 Image of dynamic imaging

7 结 论

利用自准直原理实现自动检焦, 通过理论分析与试验验证, 检焦目标源对比度高, 检焦信号容易提取与识别, 可靠性高, 可满足航空相机检焦的高精度要求。该方法可应用于各类带有扫描反射镜的航空相机的自动检焦设计与研究之中。

参考文献:

- [1] 丁亚林, 田海英, 王家骥. 空间遥感相机调焦机构设计[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(1): 35-38.
DING Y L, TIAN H Y, WANG J Q. Design on the focusing mechanism of space remote-sensing camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 35-38. (in Chinese)
- [2] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所研究生部教材, 1998.
WANG J Q. *Optical instrument collectivity design* [M]. Changchun: Teaching Material of Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998. (in Chinese)
- [3] 张洪文. 一种检测全景式航空照相机斜距调焦机构性能的方案[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(增): 14-17.
ZHANG H W. One Program for testing focusing mechanism in panoramic cameras[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(Supp.): 14-17. (in Chinese)
- [4] REYNOLDSA G, HAMMONDA M, BINNSA L A. Camera Correlation Focus: An image-based focusing technique [J]. *SPIE*, 5752: 1032-1041.
- [5] 李朝辉, 王肇勋, 武克用. 空间相机 CCD 焦平面的光学拼接[J]. 光学 精密工程, 2000, 6(3): 213-216.
LI ZH H, WANG ZH X, WU K Y. Optical assembly of CCD focal plane for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 6(3): 213-216. (in Chinese)
- [6] XIAN T, SUBBARAO M. Camera calibration and performance evaluation of depth from defocus (DFD)[J]. *SPIE*, 6000, 60000A1-60000A10.
- [7] 郝道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社; 81-84.
YU D Y, TAN H Y. *Optical Engineer* [M]. Beijing: China machine Press; 81-84. (in Chinese)