

航空摄影的光栅自校准检调焦技术

李大伟, 刘明

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 在航空摄影中, 会由于温度、气压参数变化, 使相机像面发生离焦。光栅自适应检调焦方法, 性能可靠、环境适应性强, 是摆镜式航拍相机自动检调焦的首选技术。本文用光栅成像自适应原理, 阐述了光栅参数与摆镜角速度、光电接收时间的关系, 设计出实用机构。应用此技术, 使自动检调焦的焦平面位置, 达到像面 1/4 焦深以内, 通过飞行验证, 图像优良。该技术适用于有反射摆镜结构的长焦距相机。

关键词: 光栅; 自校准; 自动检调焦

中图分类号: TH741

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2011)02-0008-04

Aerial Photography of Grating Self-calibration Detection and Auto-focusing Technology

LI Dawei, LIU Ming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033)

Abstract: In aerial photography, the variation of temperature and pressure make the camera defocusing. With high reliable and great adaptive capacity to environment, the raster self-adapting detection focus method will be the preferred technology on automatic focus. This paper explains the relation of raster parameter, swinging mirror angular velocity and photoelectric receiving time using principle of raster self-adapting imaging, and designed mechanics for it. The focus plane depth will be within the quarter. The imaging has high quality after flight experiment. This technology can be applied to telephoto camera with the swinging mirror structure.

Key words: grating; self-calibration; auto-focusing

航空摄影的环境温度、气压参数变化会使相机镜头光学元件和支撑件产生轴向变形, 使相机像面偏离焦面, 并处于不稳定状态, 当离焦量大于相机焦深时, 成像点在像面弥散等现象, 使图像模糊。所以相机拍照前, 需调整像面与焦面重合。利用光栅进行检调焦的自校准方法, 是在像面上放置光栅作目标源, 通过光学系统后, 经反射镜反射成像到像面上, 使用光电转换元件接收, 通过接收到的能量强弱判断焦面峰点。将检焦范围分段, 逐点走到, 判断实际像面位置。1m 左右焦距的光学系统检调焦时间小于 60s。

相机自动检焦方法很多, 目前自动检焦方法有放大率法、五棱镜检焦法、图像矩心内插法、临界

角检焦法等, 各有其针对性, 优缺点不一而足, 如基于 CCD 检焦方法也是常用方法, 但对地面景物对比度有要求、输入数据多、算法繁琐, 检调焦需时较长, 提高对瞬息即逝目标的捕获能力, 信息的实时水平, 需求迫切^[1, 2]。

本文用自校准的焦面检验方法, 设计出自动检焦、调焦机构。构建了有光栅、光电接发收元件、反射摆镜和镜头组成的自适应性成像系统, 并对实际元器件功能匹配进行优选, 产品验证, 这种方法的实时性、精准性适合于现代航空摄影要求。

1 光栅校准焦面原理^[3]

检调焦方案的设计考虑, 需适应于相机的摆扫

收稿日期: 2011-03-17

作者简介: 李大伟(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事航空相机结构设计, E-mail: lidawei6410@yahoo.com.cn.

工作模式。反射镜摆动会使光线成像面一维移动，适于使用直线光栅。

直线光栅自校准检焦法，是利用摆扫相机镜头前面的扫描平面反射镜，来完成光线回路。工作前，启动扫描镜面与入射光线呈垂直状态，然后进行自动校准检焦工作，摆镜以入射光轴为对称中心做往复摆动见图 1。由物方光源发出光线，经整束光路透过位于像平面上的目标光栅，发出平行光。光线经镜头到反射镜面反射，返入镜头物镜，成像在接收光栅附近，此时，光电接收器产生调制信号。

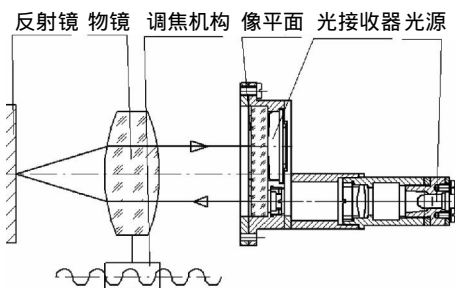


图 1 光栅检焦原理图

Fig. 1 Principle of grating autofocusing

当相机焦平面落在像面上时，物方光栅经光学系统出射的光线所成的光栅像和像方光栅轴向重合，此时光电接收器接受的光能量最大，调制信号幅值随之最大，见图 2。当相机焦平面离开像面，反射的物方光栅像不和像方光栅重合，位于像面之前或之后时，相应的调制信号幅值随之最小。当物方光栅的成像面落在相机焦深以内时，像点能量全部汇聚在光栅格内，能量集中，无耗损见图 3。此时调制信号幅值为峰值状态。当焦平面偏离于像面时，由图 4 看出，由于会聚光夹角 θ 的存在，使成像点弥散，导致能量平面扩散，反应出调制信号幅值小于成像面位于焦深内的幅值，如图 4 所示^[4]。

检焦时反射镜在垂直入射光轴位置小幅摆动，于是光电器件输出的一个调制信号，合焦状态调制信号最大，离焦状态调制信号趋小。

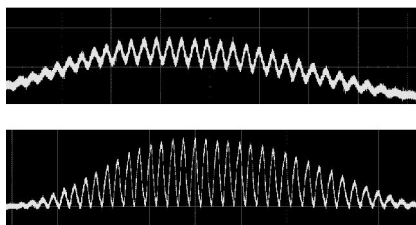


图 2 焦面像面重合时调制信号

Fig. 2 Modulated signal in defocusing and focus superposition

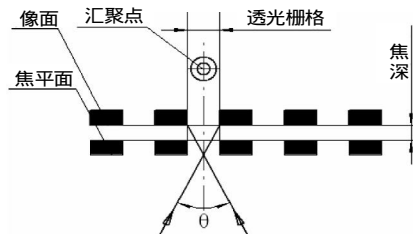


图 3 焦面像面重合示意图

Fig. 3 Focus superposition

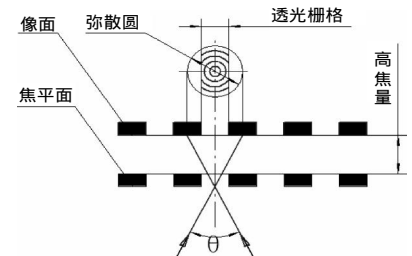


图 4 焦面像面离焦示意图

Fig. 4 Focus defocusing

图 2 是为扫描镜垂直于入射光轴，往复摆扫产生的波形图，图中上部是离焦位置，波形复制变化不大，下部是在对焦位置，波形呈正态分布趋势。其中，每个波形是摆镜往复转动一次产生的波形，波形数量既是不同焦面位置的测量次数。与波形峰值相对应位置就是测量的焦平面位置。

通过接收的能量来判断焦面位置，为提高监测效率。在整个检焦范围内，先分成大的步进距离，逐点检焦，判断最大值点，在最大值前后的大步进范围内，再分成中等的步进距离，逐点检焦，再找最大值点；为确保准确，重复一次上述步骤，判定最大值点，作为像面位置。

2 光栅自校准法的周期及摆角幅度

检焦采用光栅为透射式直线光栅，其光栅常数为 d ，缝间与缝宽相等，要求物方光栅成像在像方光栅轴，往复摆扫，产生调制信号，工作原理如图 5 所示。

由图 5 可知，随着反射镜转动，反射光线角度是入射光线转动角度的 2 倍，

相机焦距 600 mm，F 数为 5.6，成像谱段 λ 波长 480 ~ 750 nm，焦深 δ 为；

$$\delta = 4F^2 \lambda = 0.082 \text{ mm} \quad (1)$$

摆扫角度 ωt 产生的轴向位移 Δl 与镜头焦深 δ 与光栅常数 d 间的关系为；

$$\Delta l = 1 - \cos(2\omega t) \leq \delta \quad (2)$$

既；
$$\omega t \geq \frac{\arccos(1-\delta)}{2}$$

可见转角 ωt 大于一定数值，调焦量才能覆盖整个焦深范围。同时，摆动转角 ωt ，对应的光栅常数 d 要小于扫描幅度，才可透过栅格，实现光电转换。

物方光栅的像沿一条透光栅格移动一个栅格常数 d 的扫描时间 t 要与光电接收器的响应时间 t_m 适应。由图 5 可知，摆扫角速度 ω 、光栅常数 d 、镜

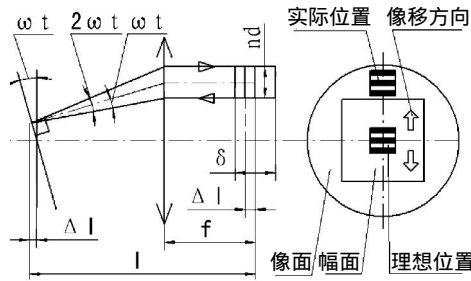


图5 检焦摆动位置图

Fig. 5 Process of autofocusing

头焦距 f 与反射镜的扫描时间 t 关系为：

$$t = \frac{\tan^{-1} \frac{d}{f}}{2\omega} \geq t_m \quad (3)$$

长焦距镜头 $f \gg d$ ，式(1)近似为：

$$t = \frac{d}{2\omega f} \geq t_m \quad (4)$$

式(3)中参数关系扫描时间和反射镜摆动角速度 ω 镜头焦距 f 成反比，扫描时间与光栅常数 d 成正比。设计时，尽可能增大光栅常数 d ，减小反射镜摆动角速度 ω 都可以使光电转换获得充分时间，保证检焦精度，在此条件下，缩短检焦时间才有意义。

3 光栅在像面上空间定位

只有光强度变化，才能得到动态调制信号，这需要物方光栅和像方光栅的栅格错位移动，所以，反射镜垂直于光轴，在光栅幅面范围往复摆动。

光栅布置在像面上有效孔径范围内任何位置，都可进行自检焦。其中在像面中心位置，检焦效果最好，并且，只有在中心位置出射光线和反射回路光线在中心光轴重合，这样，使结构及工作环节简化，且便于装调。不过，在头像面中心位置通常用来置放图像传感，是有效画面，不可占用。在透射式光学系统幅面中心安置检焦器件，会使结构复杂，像质降低。

光栅的摆放位置，既要在有效像面，又不能占用图像感应器画幅，只有图5所示光栅位置满足要求。光栅所处位置在焦平面上轴外点，经光学系统反射回来的像，与物方光栅投射出的影像对于该点光轴共轭，光栅栅格的摆放方向，要和与摆镜摆动方向垂直，做小于光电池尺寸范围的往复摆动。这样，物像栅格平行错移产生光能变化。

保证光栅刻线与像原感光面在光学平面上的—致性，才能准确检得焦平面精度。把光栅刻画面于像元感光面，置于同侧，并在同一平面，即可满足

检焦工作。但出于保护光栅刻线的考虑，工程上要求把光栅玻璃基板面向镜头侧，将产生着光栅基板玻璃光程，使得焦面后移。为此，装调时，把光栅刻划面与像元感光面按光程差的距离拉开，其偏移量 Δ 为：

$$\Delta = d(1 - \frac{1}{n}) \quad (5)$$

其中， d 是光栅玻璃基板厚度， n 是光栅玻璃基板折射率。

4 光源与光电转换器的筛选

检焦系统的光源安置在光学系统的远轴光路上，其相面照度随视场角余弦的4次方下降，为使照射能量集中，光源需经的准直性整束，出射为平行光源，并且由于光的回射成像，其总透过率，扩大2倍，像面照度不受光源的离轴影响。

根据光照度公式，像面照度 E' 可描述为；

$$E' = 2T\pi B \sin^2 U' \cos^4 U_p = \frac{T\pi B}{2} (\frac{D}{f})^2 \cos^4 U_p \quad (6)$$

上式表明；当光源在轴上时， U' 为像方孔径角，视场角 U_p 为零，相机光源为平行光，可视为轴上光源，上式的 $\cos^4 U_p = 1$ ，(6)式改写为；

$$E' = \frac{T\pi B}{2} (\frac{D}{f})^2 \quad (7)$$

其中： D/f 为光学系统的相对孔径， U' 为像方孔径角， U_p 为视场角， T 为光学系统的总透过率。光源亮度为 B [5]

光源在焦面成像照度 E 的大小，应在光电转换器饱和输出光强与光电转换器达到噪声程度之间，才能使光电转化器正常工作。光源发射谱段，与接收器谱段相适应，用非相关光源白光作为成像，光线经过检焦光栅栅格时产生色散，接收元件感光面光能分布不均，影响接收，单色光来检焦，不会发生前述问题。每种单色光的波长不一样，选择与接收元件中心波段相匹配的单色光源。

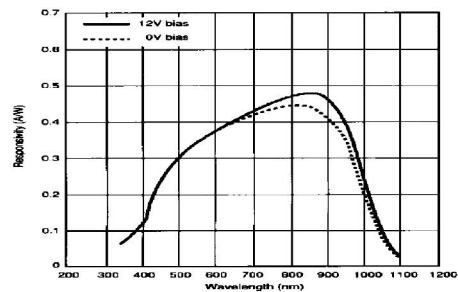


图6 光电转换器光谱响应图

Fig.6 Typical spectral responses

跟据计算和实际条件,采用光栅常数 0.1mm,扫描速度 0.4rad/s,光源采用谱段为 800nm 的红光发光二极管,接收元件采用 Centorionic 公司的光谱为 400 ~ 950nm,面积 1cm 峰值为 800 nm,响应度 $2.3 \times 10^5 \text{V/W}$, t 升时间 77 μs 的光敏二极管见图 6,构成检焦系统。

用电位计作为位置记录器,反馈的检焦位置与光学标定位置偏差为 0.011mm,600 焦距的相机镜头的检焦精度在焦深的 1/4 以内满足使用要求。

经过自动检调焦所成的图像,获得良好的地面分辨率,图 7 为 1:15000 比例尺的航拍图像。



图 7 自检焦航拍图像

Fig.7 Self-check focal aerial images

(上接第 27 页)

4.2 测试结果

采用直接比较法检测回转机构的测角误差。由模拟器圆感应同步器测量主控制器设定的回转角度值,其结果与平行光管和 24 面棱体组合测量的实测值相比较,即为角度误差。注意在测量过程中,需设定另一个回转轴转角零位位置,测量结果如表 1 所示,达到技术指标要求。

5 结论

本文设计的具有转动功能太阳模拟器与一般的固定式太阳模拟器不同,可以在实验过程中改变在太阳辐射的方位与俯仰状态。设计的具有两个转动环节的太阳模拟器,在计算机控制下,通过步进电机细分技术与高分辨率感应同步器闭环控制,精确模拟出太阳光不同的照射方向和照射过程,解决了动态模拟太阳辐射的难题。通过转角误差的分析与计算,所设计的转动机构方位、俯仰角

5 结论

光栅自校准检焦法,其检焦参数的提取,是借助于相机自身的功能,不依赖于拍摄目标对象,也不受周边工作环境影响,在性能稳定、工作可靠性、检焦时间检焦精度上,均表现优良。适用于具有扫描反射镜结构的、每次拍摄需调整焦面的高空相机。

参考文献

- [1] 李朝晖,武克用.图像矩形内插法在空间相机实时检焦中的应用[J].光学精密工程,2000,8(8):335-337.
- [2] 梁翠屏,乔彦峰.简析光学系统自动调焦方法[J].光电与控制,2006,13(12):93-96.
- [3] 匡海鹏,李朝晖,乔燕燕.空间相机自准法检焦原理的研究和应用[J].空间科学学报,2002,22(10)增刊2:117-122.
- [4] 惠守文.长焦距斜视实时航空相机自动调焦技术的研究[D].中国科学院长春光机所硕士论文,2003,4:7-11.
- [5] 胡家升.光学工程导论[M].大连:大连理工大学出版社,2006:259-260.

控制精度达到 0.02° 。并在航天器位置敏感部件地面试验中得到应用。

参考文献

- [1] 王浚,黄本诚,万才大.环境模拟技术[M].北京:国防工业出版社,1996,5:580-586.
- [2] 赵吉林,仲跻功,陈兴.TM-3000A1 太阳模拟器的研究[J].太阳能学报,1981,2(4):417-424.
- [3] Ryuichi, Shimokawa. Supplementary-light method for Measuring the conversion Efficiency of multifunction solar cells[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1989(5): 845-848.
- [4] 吴鸿业.蜗轮蜗杆传动设计[M].北京:机械工业出版社,1986:69-98.
- [5] 端木时夏.圆感应同步器及其测角装置[M].上海:同济大学出版社,1990:1-156.
- [6] 毛英泰.误差理论与精度分析[M].北京:国防工业出版社,1984:161-239.
- [7] 马宏,王金波.误差理论与仪器精度[M].兵器工业出版社,2007:227-231.