

doi:10.3788/gzxb20134207.0797

# 基于像散法的线阵 CCD 相机检焦技术

王智

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘 要:** 航天立体测绘相机受卫星发射过程的振动、冲击以及复杂的空间环境的影响, 相机的靶面将不同程度地偏离相机的焦平面, 导致图像分辨率下降. 对于测绘相机, 其主点位置和主距变化量直接影响地面目标定位准确度. 为了弥补利用编码器进行检焦的不足, 提出了一种基于像散量的检调焦方法. 该方法采用四象限光电探测器测量相机靶面变化引起的像散量, 参照已标定的靶面位置与像散量之间的关系, 计算出靶面偏离相机焦平面的实际大小和方向. 这种检焦方法包含引起相机靶面离焦的所有因素, 试验结果表明, 基于像散法的测绘相机调焦机构的分辨率可达 0.025 mm.

**关键词:** 像散; 四象限探测器; 立体测绘相机; 检调焦

中图分类号: TP7; TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)07-0797-4

## Inspection Focus Technology Based on Astigmatic Method for Linear CCD Camera

WANG Zhi

(Changchun Institute of Optics, fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The target plane of the space tridimensional mapping camera will be deviated from the focal plane, under the condition of space environment and vibration, impact when satellite is launching, and image resolution ratio will be descended because of defocusing. For tridimensional mapping camera, principal point position and focal length variation of the camera affect positioning accuracy of ground target. In order to revise the shortage of photoelectric encoder utilization, the measuring and focusing method was put forward based on astigmatism. A quadrant detector was adopted to measure the astigmatism caused by the deviation of the target plane, refer to calibrated relation between the target plane position and the astigmatism, so the deviation vector of the target plane can be obtained. This method includes all factors caused deviation of the target plane, and experimental results show that the focusing resolution of mapping camera focusing mechanism based on astigmatic method can reach 0.025 mm.

**Key words:** Astigmatism; Quadrant detector; Tridimensional mapping camera; Inspection focus

## 0 引言

传输型星载立体测绘相机是对地摄影测量最有效的方法和手段, 由具有独立镜头的三个线阵 CCD 相机组成, 相机之间保持一定的位置关系. 利用三线阵 CCD 相机进行立体测绘是 20 世纪 80 年代由德国科学家首先提出, 并研制出一系列测绘相机. 我国

对于传输型立体测绘相机的研制工作刚刚起步, 第一代立体测绘卫星已发射成功. 但其分辨率及测绘准确度与国外还存在不小差距<sup>[1-3]</sup>.

在传输型立体测绘相机中, 线阵 CCD 相机内方位元素的准确度稳定性直接影响到测绘准确度. 受卫星发射过程的振动以及复杂空间环境的影响, 会使相机的 CCD 靶面偏离相机的焦平面, 导致图像分

基金项目: 中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖”获得者科研启动专项资金

第一作者: 王智(1978—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为航天光学遥感器的设计. Email: wz070611@126.com

收稿日期: 2012-10-17; 录用日期: 2012-12-27

辨率下降,因此必须设计有检调焦环节以补偿上述原因引起的 CCD 靶面位置的变化。

用于测绘相机的检调焦技术,主要是由光电编码器作为检焦元件,地面试验标定 CCD 靶面离焦量与编码器码值之间的对应关系,相机在轨运行时,根据编码器返回的码值来判断 CCD 靶面离焦量的大小和方向<sup>[4-6]</sup>,由步进电机驱动调焦机构对 CCD 靶面的离焦量进行补偿。在卫星发射及复杂的空间环境影响下,相机的各透镜间的间隔可能发生变化,变化的程度可能会导致光学系统的焦距发生变化,如果相机焦距发生变化,则编码器返回的码值就变的不可信。另外,应用于航天领域的编码器是角度传感器,是把线性的离焦量由传动机构转化成角量,再由编码器检出。测绘相机的检调焦准确度要求很高,采用这种检焦方法增加了一个误差环节,因此,为了提高航天测绘相机检调焦准确度,减少误差源,本文提出了一种基于像散法的检调焦技术。

## 1 基于像散法检焦系统的原理

基于像散法检焦系统原理如图 1 所示,从半导体激光器 LD 发出的椭圆的线偏振光,经过准直镜 CL 成平行光束,穿过偏振分束镜(Polarizing Beam-Splitter, PBS)及波片 QWP,此波片的光轴与入射的线偏振光成 45°夹角,经由 1/4 波片的作用而形成圆偏振光,最后通过物镜(相机镜头)聚焦到一平面反射镜 RL(CCD 靶面)上,从平面反射镜 RL 反射的圆偏振光经物镜,再一次通过 1/4 波片形成与原入射光相互垂直的线偏振光,此时激光束不再通过偏振分束镜,而是经过偏振分束镜被四象限探测器 QD 所接收,其产生的光电信号经过一个四输入端

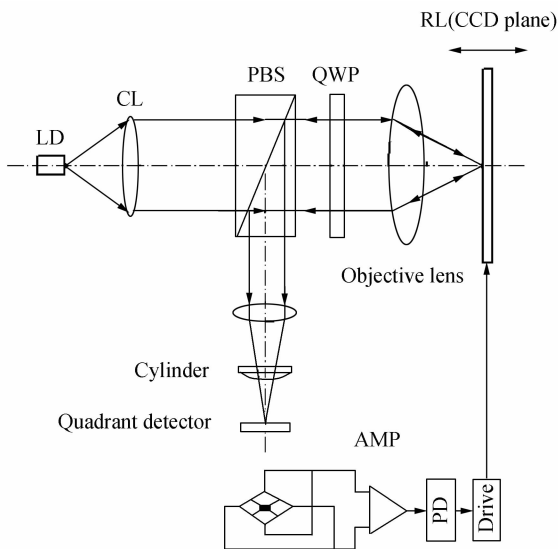


图 1 基于像散法检焦系统原理

Fig. 1 The schematic diagram of inspection focus system

的加减运算放大器,将信号经过加减运算放大之后形成聚焦误差信号。

当 RL(CCD 靶面)位于镜头的焦平面时,反射光束投射到光电探测器上成圆形,且位于中央,四个象限的光能量相同,因而输出也相同;当 CCD 靶面位于近焦面时,反射光束投射到光电探测器上的光斑呈纵向椭圆形,且四个象限中,一、三象限输出大,二、四象限输出小;当 CCD 靶面位于远焦面时,光电探测器的输出与近焦相反(如图 2)。

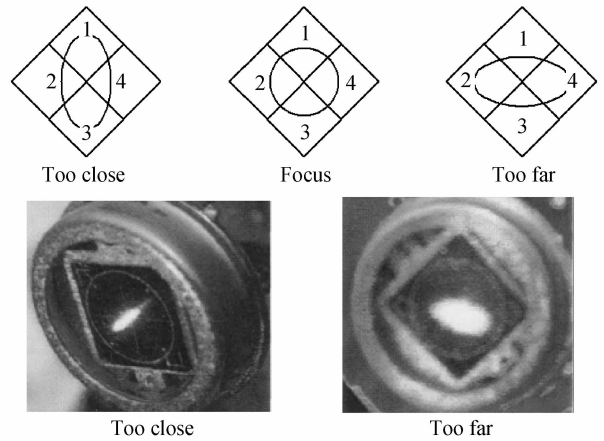


图 2 四象限光电探测器

Fig. 2 Four-quadrant photoelectric detector

光电探测器上第一、三象限的输出与第二、四象限的输出就是就是聚焦误差信号 (Focus Error Signal, FES),若探测器 A 各象限输出分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ ,那么聚焦误差信号 FES 可写为

$$FES = \frac{(A_1 + A_3) - (A_2 + A_4)}{\sum_{i=1}^4 A_i} \quad (1)$$

如果相机的 CCD 靶面离焦,会使光电探测器产生聚焦误差信号,这一信号经数据处理后被用来控制 CCD 靶面沿光轴方向相应的微动,以保证 CCD 靶面在相机的焦平面上。

## 2 像散法检焦光学系统建模

像散法检焦光学系统模型如图 3。

根据透镜成像公式,得

$$\begin{cases} \frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} = \frac{1}{f_1} \\ -\frac{1}{k} + \frac{1}{b_2} = \frac{1}{f_2} \end{cases} \quad (2)$$

设  $r_x$ 、 $r_y$  分别为四象限探测器椭圆光斑的长轴和短轴, $r_1$ 、 $r_2$  分别为物镜和柱透镜的口径半径, $m$  为柱透镜至四象限探测器的距离。由几何关系可得

$$\begin{cases} r_x = \frac{r_2(m - b_2)}{b_2} \\ r_y = \frac{r_2(k - m)}{k} \end{cases} \quad (3)$$

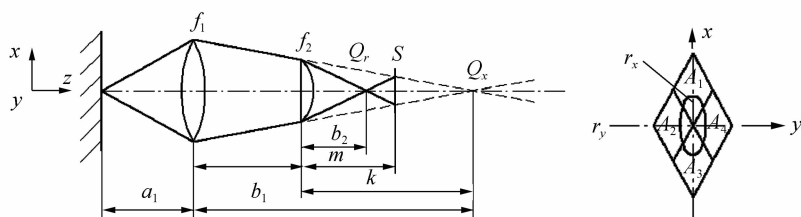


图3 像散法检焦光学系统模型

Fig. 3 Model of inspection focus optical system which based on astigmatic method

$$k = b_1 - l = \frac{a_1 f_1 - a_1 l + f_1 l}{a_1 - f_1} \quad (4)$$

因为  $r_2 = r_1 k / b_1$ , 所以

$$r_2 = r_1 - \frac{r_1 l (a_1 - f_1)}{a_1 f_1} \quad (5)$$

由式(2)~(5)可得

$$\begin{cases} r_x = r_1 \left[ 1 - \frac{l(a_1 - f_1)}{a_1 f_1} \right] \times \left[ \frac{m}{f_2} - 1 + \frac{m(a_1 - f_1)}{a_1 f_1 - a_1 l + f_1 l} \right] \\ r_y = r_1 \left[ 1 - \frac{l(a_1 - f_1)}{a_1 f_1} \right] \times \left[ 1 - \frac{m(a_1 - f_1)}{a_1 f_1 - a_1 l + f_1 l} \right] \end{cases} \quad (6)$$

### 3 四象限光电探测器聚焦误差信号建模

光电探测器摆放的位置对系统灵敏度有较大影响,建立如图4所示的坐标系。

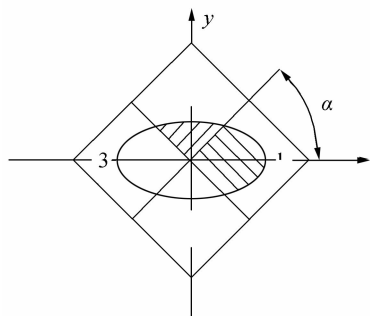


图4 四象限探测器上的光斑

Fig. 4 The facula in four-quadrant photoelectric detector

由图4可求得第一、二象限的输出分别为  $KI_0 S_1/S$  和  $KI_0 S_2/S$ , 其中  $K$  为光电探测器的光电灵敏度,  $S$  为椭圆面积,  $S = \pi r_x r_y$ ,  $r_x$ 、 $r_y$  分别为椭圆在  $x$ 、 $y$  轴上的半径.  $S_1$ 、 $S_2$  分别为椭圆在第一、第二象限中的面积。

由式(1),可求得

$$FES = KI_0 \frac{2(S_1 - S_2)}{S} \quad (7)$$

椭圆的极坐标方程为

$$\begin{cases} \rho^2 = r_x^2 \cos^2 \beta + r_y^2 \sin^2 \beta \\ \tan \theta = \frac{r_x}{r_y} \tan \beta \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\rho$ 、 $\theta$  为极坐标的矢径和极角,  $\beta$  为中间参量

$$S_1 - S_2 = \int_{\alpha-90^\circ}^{\alpha} \frac{1}{2} \rho^2 d\theta - \int_{\alpha}^{\alpha+90^\circ} \frac{1}{2} \rho^2 d\theta =$$

$$r_x r_y \left[ \arctan \left( \frac{r_x}{r_y} \tan \alpha \right) + \arctan \left( \frac{r_x}{r_y} \tan \alpha \right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad (9)$$

式中,  $\alpha$  为探测器分划线与坐标轴的的夹角,如图4。

对式(9)  $\alpha$  求导,得

$$(S_1 - S_2)' = \frac{r_x^2 r_y^2 (r_y^2 - r_x^2) (\tan^4 \alpha - 1)}{(r_y^2 + r_x^2 \tan^2 \alpha) (r_x^2 + r_y^2 \tan^2 \alpha)} \quad (10)$$

由式(9)可知,当  $\alpha = 45^\circ$  时,  $(S_1 - S_2)' = 0$ , 即  $|S_1 - S_2|$  最大,这说明当探测器分划线与椭圆两轴成  $45^\circ$  时,灵敏度高。当  $\alpha = 45^\circ$  时,由式(7)和(10)得

$$FES = KI_0 \left[ \frac{4}{\pi} \arctan \left( \frac{r_x}{r_y} \right) - 1 \right] \quad (11)$$

### 4 FES 信号仿真分析

装置中物镜(相机镜头),其焦距:650 mm;数值孔径:1/5;  $f_1 = 99.9607$ ;  $f_2 = 88.7136$ ;  $l = 38.8$ ;  $m = 40.54$ ;  $r_1 = 15$ . 测绘相机的焦深为:  $4F^2 \lambda = 4 \times 5^2 \times 0.5876 = 58.76 \mu\text{m}$

测绘相机的离焦主要是因为环境条件变化引起,经过分析计算,需调整 CCD 靶面沿光轴方向移动  $\pm 1$  mm 即可以得到补偿。

由前面的计算分析可知,当 CCD 靶面沿光轴微小移动时,将会引起四象限探测器的聚焦误差信号发生变化,在相机的焦平面附近这一变化是线性的。因此,精确测量出系统聚焦误差信号随 CCD 靶面位置的变化曲线后(见图5),可根据曲线的线形确定系统的线性响应范围,对于某一确定的光学系统,这

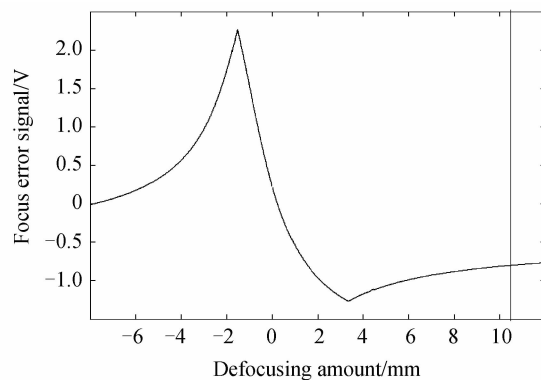


图5 FES 与 CCD 靶面位置关系

Fig. 5 The relational curve between FES and position of the CCD target

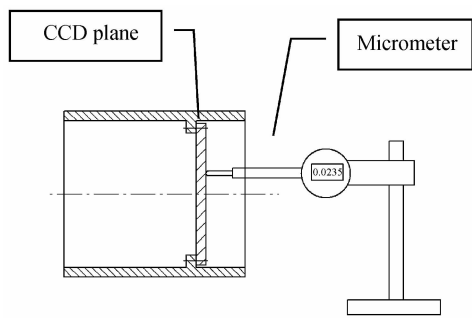


图 6 分辨率检测示意

Fig. 6 Sketch of resolution measure

一线性区的大小是固定的. 通过对聚焦误差信号仿真分析可以看出该系统的线性区间满足调焦范围的要求, 其像散量的分辨力高于调焦机构的机械分辨率, 所以该系统的调焦分辨率为调焦机构的分辨率, 分辨率检测示意图见图 6<sup>[7-10]</sup>.

图 6 的检测原理为: 由步进电机驱动调焦机构使 CCD 靶面沿光轴方向移动, 在移动过程中, 用测微表垂直顶在 CCD 靶面上, 调焦机构的分辨率即为系统的分辨率, 检测数据如表 1.

表 1 检测数据

Table 1 Measure data

No.	Motor step number	CD plane shift/mm
1	100	0.023 5
2	100	0.024
3	100	0.022
4	100	0.022 5
5	100	0.025
6	100	0.022 5
7	100	0.023
8	100	0.021

## 5 结论

本文提出了一种基于像散法的线阵 CCD 相机检调焦技术, 与传统的检焦方法比较, 可减少误差环节, 提高检焦的准确度及可靠性. 建立了像散法检焦光学系统模型和四象限光电探测器聚焦误差信号模型, 仿真分析结果表明了该方法用于线阵 CCD 相机检调焦的可行性, 同时试验表明了其分辨率可满足测绘相机的要求.

### 参考文献

[1] HU Xin, CAO Xi-bin. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images[J]. *Journal of HARBIN Institute of Technology*, 2008, **40**(5): 695-699.

- 胡莘, 曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘准确度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, **40**(5): 695-699.
- [2] WANG Zhi, ZHANG Li-ping, LI Zhao-hui. Imaging and error model of three-linear tridimensional mapping camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(1): 95-100.  
王智, 张立平, 李朝辉. 三线阵立体测绘相机构像及误差模型的建立[J]. 光电工程, 2010, **37**(1): 95-100.
- [3] GAO Wei-jun, SUN Li, WANG Chang-jie, et al. Design and verification of three-line array camera for ZY-3 high resolution stereo mapping satellite[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2012, **33**(3): 25-34.  
高卫军, 孙立, 王长杰, 等. “资源三号”高分辨率立体测绘卫星三线阵相机设计与验证[J]. 航天返回与遥感, 2012, **33**(3): 25-34.
- [4] WANG Zhi, ZHANG Li-ping, YAO Hui. Design on optical lens of three-linear tridimensional mapping camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 227-232.  
王智, 张立平, 姚惠. 三线阵立体测绘相机光学镜头的设计[J]. 光子学报, 2010, **39**(2): 227-232.
- [5] WANG Zhi, QIAO Ke, ZHANG Li-ping. Implementation of LMCCD camera for stereo mapping satellite using three-line array CCDs[J]. *OME Information*, 2010, **27**(11): 110-114.  
王智, 乔克, 张立平. 三线阵立体测绘卫星 LMCCD 相机的实现[J]. 光机电信息, 2010, **27**(11): 110-114.
- [6] WANG Zhi, ZHANG Li-ping, LI Zhao-hui. Design on focusing mechanism of space tridimensional mapping camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 1051-1056.  
王智, 张立平, 李朝辉. 传输型立体测绘相机的调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(5): 1051-1056.
- [7] WANG Xin, XU Shu-yan, SUN Rong-chun, et al. Study of autofocusing technique for space remote sensing camera[J]. *Infrared*, 2007, **28**(6): 1-6.  
王昕, 徐抒岩, 孙荣春, 等. 空间遥感相机的自动检焦技术研究[J]. 红外, 2007, **28**(6): 1-6.
- [8] HU Bing-liang, CAO Jian-zhong, XIONG Ren-sheng, et al. Auto adjust focusing of verity focus[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 1004-1006.  
胡炳梁, 曹剑中, 熊仁生, 等. 变焦距镜头组的自适应调焦的实现[J]. 光子学报, 2003, **32**(8): 1004-1006.
- [9] ZHAO Mei, MA Zhong-zhou, TANG Hai-yan, et al. Auto-focusing system based on CCD aerial cameras[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(11): 77-81.  
赵梅, 马中洲, 唐海燕, 等. 基于 CCD 的航空相机自动检焦系统[J]. 光电工程, 2008, **35**(11): 77-81.
- [10] ZHI Xi-yang, ZHANG Wei, HOU Qing-yu. Effects of geometric specification difference on stereoscopic mapping for dual-linear-array CCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 425-429.  
智喜洋, 张伟, 侯晴宇. 两线阵 CCD 相机几何指标差异对立体测绘的影响[J]. 光子学报, 2012, **41**(4): 425-429.