

doi:10.3788/gzxb20144308.0822001

三线阵立体测绘相机光学系统的调焦分析

王红, 田铁印

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 长春 130033)

摘 要:针对三线阵立体测绘相机 CCD 成像靶面偏离最佳像面位置, 影响成像质量的问题, 根据光学系统的设计参量, 计算测绘相机的调焦准确度, 分析像方远心光路对测绘相机调焦准确度及调焦对测绘准确度的影响。结果表明, 光学系统的调焦范围为 ± 2 mm; 当采用像方远心光路, 在允许离焦的范围内进行调焦时, 产生的投影畸变可忽略不计, 调焦后光学系统的成像质量、畸变要求满足高测绘准确度要求。

关键词:测绘相机; 测绘准确度; 光学设计; 调焦分析; 像方远心

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)08-0822001-4

Focusing Analysis on Optical System of Three Line Array Stereoscopic Mapping Camera

WANG Hong, TIAN Tie-yin

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: For the imaging quality problem which induced by the deviations from the CCD imaging target surface to the best image plane position of three linear array stereo mapping camera, the focusing precision was calculated according to the design parameters of the optical system, and effect of the telecentric system on the mapping accuracy was analyzed. Telecentric system is adopted to meet the requirement of stereoscopic mapping, the focusing range is about ± 2 mm, and the distortion can be negligible within focusing range. After focusing, the optical system imaging quality and distortion meet the requirement of high accuracy of mapping.

Key words: Mapping camera; Mapping accuracy; Optical design; Focusing analysis; Telecentric

OCIS Codes: 220.1140; 220.2740; 220.3620; 220.4830; 220.4840

0 引言

中分辨率三线阵立体测绘相机由于具有体积小、重量轻和功耗小等优点, 成为地外星球测绘测量的主要传感器。开展对三线阵立体测绘相机系统的研究, 为在小卫星上应用或对月进行传输型立体测绘奠定基础^[1]。立体测绘相机包括多项关键技术, 其中精密调焦技术是星载长焦距、高分辨立体测绘相机不可或缺的关键技术之一^[2]。测绘相机光学系统焦距长, 卫星发射过程中的振动、冲击及复杂多变的在轨温度、压力等环境的影响, 将使相机的 CCD 靶面和光学系统的焦平面产生偏离, 降低成像质量, 直接影响测绘准确度, 因此

相机需要调焦机构在轨进行相机焦平面位置的调整及相机离焦量的补偿^[3]。美国的系列火星探测任务及 2011 年发射的“好奇号”漫游车上装载的桅杆相机均采用了调焦系统^[4]。西安光学精密机械与物理研究所的贺应红等设计的对焦式着陆探测相机光学系统, 采用准远心结构, 对远近目标成像时, 移动调焦组可在像面上获得清晰的成像, 而且不同距离的目标, 在调焦过程中, 系统的焦距不变^[5]。对于立体测绘相机的调焦机构设计^[6]、调焦机构误差分析^[7]、调焦机构精度分析^[8]以及调焦方式对测绘相机主点位置的影响^[9], 等均有相关文献报道。

本文从光学系统设计的角度, 分析比较了像方远

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60507003)资助

第一作者: 王红(1968—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间遥感光学系统设计. Email: wanghong@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2014-04-29; 录用日期: 2014-06-16

<http://www.photon.ac.cn>

心光路和非像方远心光路对测绘相机调焦精度及调焦对测绘精度的影响. 采用像方远心光路时, 在允许离焦的范围内进行调焦时, 光学系统产生的投影畸变可以忽略不计, 确保相机的测绘精度不受调焦的影响而降低. 检测结果验证了调焦分析的正确性.

1 相机工作原理

三线阵立体测绘相机的光电扫描成像部分由光学系统焦面上的 3 个线阵 CCD 传感器组成, 三个线阵 CCD 相互平行排列并与航天飞行器飞行方向垂直. 当航天飞行器飞行时, 每个 CCD 以一个同步的周期 N 连续扫描地面并产生 3 条相互交迭的条带图像, 这 3 个 CCD 成像角度不同. 垂直对地成像的相机称为正视相机, 向前倾斜成像的相机为前视相机, 而向后倾斜成像的相机称为后视相机. 前、后视相机具有一定的交会角. 在测绘时, 需要知道每个扫描时刻 N 时三线阵相机的外方位元素, 即相机坐标系的原点在地球坐标系中的位置和姿态角, 知道三线阵相机的内方位元素, 即相机的主距、主点位置和交会角, 那么地面上任一物点在三个不同时刻时在三条线阵 CCD 上的像点坐标可以确定, 反之, 如果能够求出对应的像点坐标, 那么可以计算出地面上任一物点的坐标, 这就是三线阵 CCD 相机进行立体测绘的原理^[8]. 如图 1.

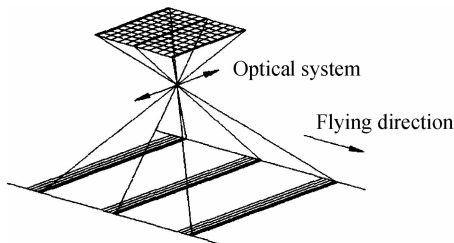


图 1 三线阵测绘相机工作原理

Fig. 1 Configuration principium diagram of three line array mapping camera

三线阵立体相机的光学系统决定了相机的外形尺寸和布局, 为保证相机的小型化、轻量化及稳定性, 根据光学系统设计指标要求, 综合考虑空间环境适应性、结构布局等因素, 采用像方远心光路, 设计一种兼具匹兹瓦型与对称型优点的光学系统结构^[9].

2 光学系统设计结果

2.1 光学系统参量

三线阵立体测绘相机光学系统参量为

焦距: 正视 $f' = 650.00 \text{ mm}$

前、后视 $f' = 717.20 \text{ mm}$

相对孔径: $D/f' = 1/5$

视场: 正视 $2\omega = 6.88^\circ$

前、后视 $2\omega = 6.23^\circ$

波段范围: $0.51 \mu\text{m} \sim 0.69 \mu\text{m}$

2.2 设计结果

前、后视相机的视场角小于正视相机, 设计中减少一片透镜同样可以满足使用要求. 正视相机和前、后视相机光学系统如图 2.

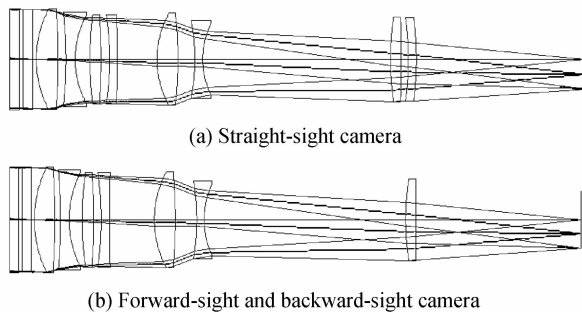


图 2 正视相机和前、后视相机光学系统结构

Fig. 2 Configuration diagram of optical system for straight-sight, forward-sight and backward-sight camera

图 3 为正视光学系统和前、后视光学系统的传递函数曲线, 正视相机光学系统全视场平均传递函数为 0.613, 前、后视相机光学系统全视场平均传递函数为 0.578. 图 4 为正视光学系统和前、后视光学系统畸变

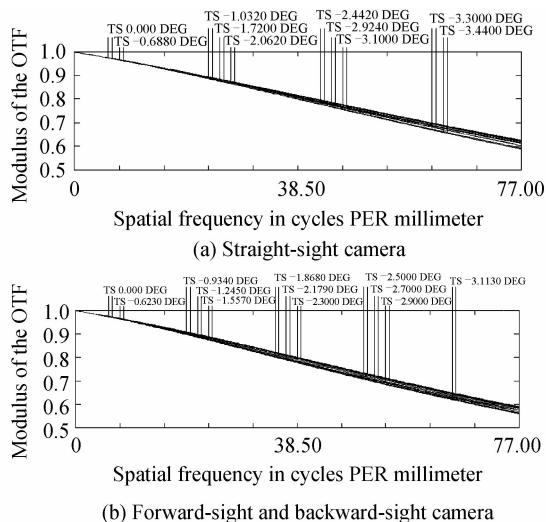
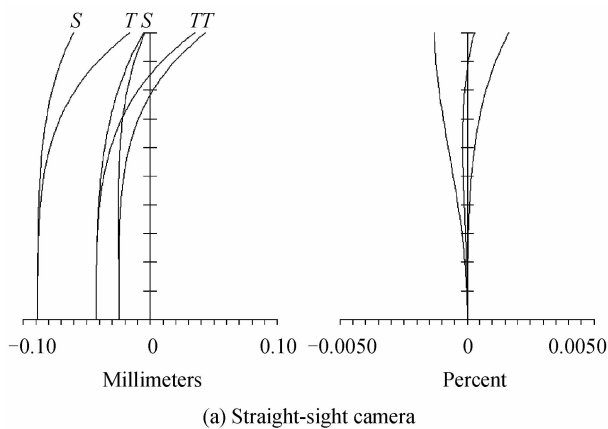


图 3 正视相机和前、后视相机光学系统传递函数曲线
Fig. 3 MTF curves of straight-sight, forward-sight and backward-sight camera



(a) Straight-sight camera

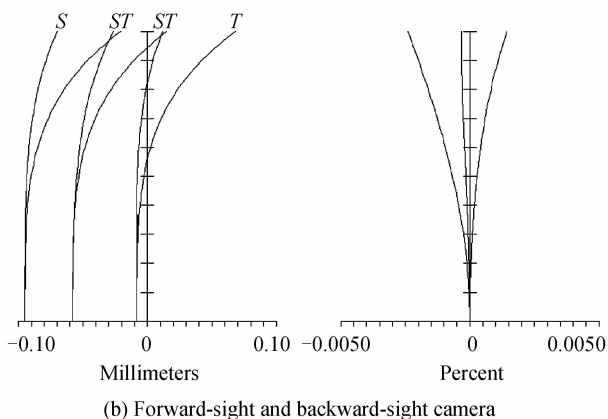


图4 正视相机和前、后视相机光学系统畸变曲线

Fig. 4 Image field curvature and distortion curves of straight-sight, forward-sight and backward-sight camera curves. 正视相机光学系统,畸变为 2×10^{-5} ; 对于前、后视相机光学系统,畸变为 2.4×10^{-5} , 满足小于 3×10^{-4} 的指标要求。

3 调焦对测绘准确度的影响

尽管相机在地面上进行了严格的检测、装调以及环境模拟,但空间环境的变化以及地面检测设备的误差等,均可使 CCD 成像靶面偏离最佳像面位置,影响成像质量,甚至得不到清晰的图像,因此调焦是必要的。

3.1 调焦准确度分析

为了减少像面的离焦量,必须保证一定的调焦准确度. 当光学系统离焦时,离焦引起的传递函数为

$$MTF_{\text{离焦}} = \frac{2J_1(X)}{X} \quad (1)$$

式中, J_1 表示一阶 Bessel 函数, $X = \pi d \nu_n$, d 表示离焦引起的弥散圆直径, $d = \Delta l / F^\#$, Δl 表示离焦量, $F^\#$ 表示相对孔径的倒数, ν_n 表示特征频率。

系统中, $F^\# = 5$, $\nu_n = 77 \text{ lp/mm}$, 光学系统的焦深 $\delta = \pm 2\lambda F^{\#2}$, $\lambda = 0.0005876 \text{ mm}$, $F^\# = 5$ 时, $\delta = \pm 0.0294 \text{ mm}$ 。

由式(1)得到不同离焦量对光学系统传递函数的影响,如表 1。

表 1 离焦对光学系统传递函数的影响 (Nyquist 频率: 77 lp/mm)

Table 1 Effect on MTF of the optical system by focusing (Nyquist frequency: 77 lp/mm)

Defocus	X	MTF _{defocus}
0.0294 (1× depth of focus)	1.43	0.76
0.0147 (0.5× depth of focus)	0.72	0.93
0.01	0.49	0.96
0.005	0.25	0.98

由表 1 可见,离焦对光学系统成像质量的影响很大,以离焦引起的传递函数 $MTF_{\text{离焦}} = 0.95$ 为判据,离焦量必须控制在半倍焦深内。

考虑到调焦机构的可实现性,像面调焦准确度确定为 0.01 mm。

光学系统在地面进行各种成像实验时,需要进行温度调焦及距离调焦,并充分留有调焦余量,本文调焦范围确定为 $\pm 2 \text{ mm}$ 。

3.2 调焦对测绘准确度的影响

光学系统成像公式为

$$y' = f' \cdot \tan \omega \quad (2)$$

式中, y' 为像高, f' 为光学系统焦距, ω 为物方视场角。

当光学系统离焦后,像高公式为

$$y' = f' \cdot \tan \omega + \Delta l \cdot \tan \omega' \quad (3)$$

式中, Δl 为离焦量, ω' 为像方视场角。

因此,离焦引起的像高变化量,即投影畸变为

$$\Delta y' = \Delta l \times \tan \omega' \quad (4)$$

正视和前、后视光学系统均采用像方远心光路,以正视相机光学系统为例,其像方最大视场角 ω' 为 1.72° , 当光学系统离焦量为 0.015 mm 时, $\Delta y' = 0.45 \mu\text{m}$, 为 1/14 个像元尺寸,相对投影畸变为 1.2×10^{-5} 。

根据式(4)得到的不同离焦量对应的投影畸变及相对投影畸变,如表 2。

表 2 不同离焦量对应的投影畸变及相对投影畸变 (像方远心)

Table 2 Defocus corresponding to the distortion and relative distortion (telecentric)

Defocus /mm	Project distortion/ μm	Equivalent number of pixels	Relative project distortion
0.01	0.30	1/21	0.81×10^{-5}
0.015	0.45	1/14.4	1.2×10^{-5}
0.02	0.60	1/10.8	1.6×10^{-5}
0.025	0.75	1/8.7	2.0×10^{-5}

如果光学系统采用的是非像方远心光路(匹兹瓦结构),像方最大视场角 ω' 为 10.32° , 不同离焦量对应的投影畸变及相对投影畸变如表 3。

表 3 不同离焦量对应的投影畸变及相对投影畸变 (非像方远心)

Table 3 Defocus corresponding to the distortion and relative distortion (non-telecentric)

Defocus /mm	Project distortion/ μm	Equivalent number of pixels	Relative project distortion
0.01	1.80	1/3.6	4.8×10^{-5}
0.015	2.70	1/2.4	7.2×10^{-5}
0.02	3.60	1/1.8	9.6×10^{-5}

对比表 2、表 3,当光学系统采用像方远心光路时,在允许的离焦范围内进行调焦,产生的投影畸变可以忽略不计,这对测绘相机提高测绘准确度是极为有利

的. 所以对于测绘相机, 在光学设计选择结构型式时, 为避免调焦对测绘准确度的影响, 首要选择考虑像方远心光路.

4 实测结果

各相机光学系统完成装调、注胶、振动后, 相机的焦平面位置发生变化, 采用 Optikos Corporation 成像分析系统测量调焦后相机的传递函数. 得到的实测结果如表 4. 表 5 为调焦后的相机畸变测试结果.

表 4 正视和前、后视相机传递函数实测结果

Table 4 MTF tested results of each camera (@77lp/mm)

MTF	Straight-sight	Forward-sight	Backward-sight
0	0.463	0.447	0.488
0.5	0.449	0.461	0.452
0.71	0.465	0.461	0.459
0.85	0.432	0.460	0.443
1.0	0.447	0.432	0.444
Average	0.451	0.452	0.457

表 5 正视和前、后视相机畸变测试结果

Table 5 Distortion tested results of each camera

	Absolute distortion/ μm	Relative distortion
Straight-sight	1.5	0.004%
Forward-sight	1.98	0.005%
Backward-sight	3.5	0.009%

由表 4、表 5 可见, 采用像方远心光路光学系统结构型式, 调焦后光学系统的成像质量、畸变要求完全可以满足高测绘准确度要求.

5 结论

根据三线阵立体测绘相机的参量要求, 选择了一种像方远心的亚对称光学系统结构型式, 通过对相机调焦准确度以及调焦对测绘准确度影响的分析, 在允许的离焦范围内进行调焦, 产生的投影畸变可以忽略不计, 这对提高相机测绘准确度极为有利. 因此对于测绘相机而言, 在光学设计选择结构型式时, 为避免调焦对测绘准确度的影响, 选择像方远心光路是必要而有效的.

参考文献

[1] WANG Zhi, ZHANG Li-ping, LI Zhao-hui. Design of 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.

[2] 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.

[3] WANG Hong-juan, WANG Wei, WANG Xin, *et al.* Space camera image degradation induced by satellite micro-vibration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10): 1212-1217.
王红娟, 王伟, 王欣, 等. 航天器微振动对空间相机像质的影响[J]. *光子学报*, 2013, **42**(10): 1212-1217.

[4] CHEN Hong-da, CHEN Yong-he, SHI Ting-ting. Error analysis for focusing mechanism of space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(5): 1349-1356.
陈洪达, 陈永和, 史婷婷. 空间相机调焦机构误差分析[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(5): 1349-1356.

[5] HE Ying-hong, YANG Jian-feng, MA Xiao-long, *et al.* Optical system design of lander camera with focusing type[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0422004.
贺应红, 杨建峰, 马小龙, 等. 对焦式着陆探测相机光学系统设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 0422004.

[6] WANG Shu-xin, LI Jing-lin, LIU Lei. Accuracy analysis of focusing mechanism in space camera with long focal-plane[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(10): 2239-2243.
王书新, 李景林, 刘磊. 大尺寸焦平面空间相机调焦机构的准确度分析[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(10): 2239-2243.

[7] SHAO Ming-dong, GUO Jiang, ZHU Lei, *et al.* Effect of focusing method on principal point of aerospace mapping camera[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(5): 773-779.
邵明东, 郭疆, 朱磊, 等. 调焦方式对测绘相机主点位置的影响[J]. *中国光学*, 2013, **6**(5): 773-779.

[8] WANG Jia-qi. Three line array stereoscopic mapping technology and application (translated text) [M]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2004.
王家骥. 三线阵立体测绘技术及其应用(译文集) [M]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.

[9] TIAN Tie-yin, WANG Hong, GU Feng-an, *et al.* Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(11): 2692-2697.
田铁印, 王红, 谷凤安, 等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(11): 2692-2697.

[10] ZHANG Xiao-hui, HAN Chang-yuan, PAN Yu-long. Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 697-701.
张晓辉, 韩昌元, 潘玉龙. 传输型 CCD 相机综合像质评价方法的研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(4): 697-701.

[11] HAN Chang-yuan. Study on optical system of high resolution space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2165-2172.
韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11): 2165-2172.

[12] 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.

[13] WARREN J. Modern optical engineering: the design of the optical system[M]. Second Edition, McGraw-HILL, Inc, 1990.

[14] ROBERT E. Optical system design [M]. McGraw-HILL, Inc, 2000.