

# 一种三线阵测绘相机 CCD 像面的装调方法\*

吴国栋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

**摘要:** 为了保证三线阵测绘相机装调后相机之间的空间位置关系,保证三线阵测绘相机应用时的测绘精度和图像质量,对三线阵测绘相机 CCD 像面的装调方法进行研究。首先,根据测绘精度和图像质量的要求,明确了三线阵测绘相机的装调指标。其次,确定了装调方案,对装调要点进行了叙述,为三线阵测绘相机的装调提供了一种装调方法。实际装调检测结果表明,应用该方法可以将相机之间空间位置关系安装到  $\alpha \leq 3''$ 、 $\beta \leq 5''$ 、 $\gamma \leq 5''$ 。该方法可以满足三线阵测绘相机之间的空间位置关系装调,具有实际应用价值。

**关键词:** 三线阵; 测绘相机; CCD 像面; 装调

中图分类号: P236 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.60

## Alignment method of CCD image plane for three-line array mapping camera

Wu Guodong

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

**Abstract:** In order to ensure the space position relations among cameras, mapping precision and picture quality when three-line array mapping camera is used, three-line array mapping camera alignment was studied. CCD image plane alignment method of three-line array mapping camera was investigated. First, according to the requirement of mapping precision and picture quality, three-line array camera alignment indicators are cleared. Second, the alignment scheme is identified, the alignment key points are described and an alignment method for three-line array mapping camera is given. Actual test shows that the space position relations among cameras can be installed as  $\alpha \leq 3''$ ,  $\beta \leq 5''$ ,  $\gamma \leq 5''$  using this method. This method can satisfy the alignment requirements of space position relations of three-line array mapping camera and has practical application value.

**Key words:** three-line array; mapping camera; CCD image plane; alignment

## 1 引言

三线阵测绘相机是空间对地观测遥感器的一种,主要用于实现对地球或其他星球表面地貌、地物三维几何信息的获取。可测制地球或其他星球表面各种比例尺的数字地图、数字高程图和数字正摄影像图。在军事上三线阵测绘相机可用于战场建设、战场准备和战场动态监测及打击效果评估等各个军事行动阶段。完成目标定位、目标区和战区三维地理环境的收集与更新;为高技术精确制导武器和远程打击武器等提供现势性良好的地形和影像数据信息;为军事指挥自动化、部队作战和模拟训练等提供军事地理

信息系统中基础的空间地理信息<sup>[1-3]</sup>。尤其在无地面控制点的摄影测量中具有重要价值<sup>[4]</sup>,同时具有测绘精度高,范围大和测绘实时动态等特点<sup>[5-6]</sup>,目前在测绘、军事、医疗、通讯等众多领域都得到了广泛应用。

## 2 三线阵测绘相机装调内容

### 2.1 三线阵 CCD 测绘相机工作原理

三线阵测绘相机的光电扫描成像部分是由光学系统焦面上的三个线阵 CCD 组成的。这三个线阵 CCD ( $A, B, C$ ) 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,三个线阵 CCD 相机以一个同步周

收稿日期: 2009-04 Received Date: 2009-04

\*基金项目: 国家自然科学基金(No.60575025)资助项目

期  $N$  连续扫描地面景物并产生三条航带图像  $A_S, B_S, C_S$ 。这三个线阵 CCD 相机的成像角度不同, 如图 1 所示,  $B$  为正视相机,  $A$  为前视相机,  $C$  为后视相机。推扫所获得的航带图像  $A_S, B_S, C_S$  的视角也各不同, 从而可以构成立体影像<sup>[7]</sup>。

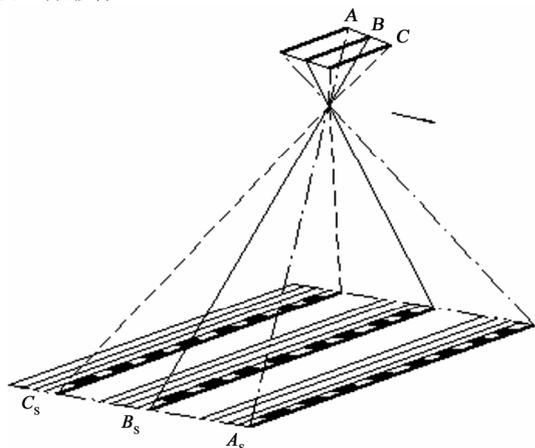


图 1 三线阵测绘相机工作原理图

Fig.1 Principle of three-line array mapping camera

## 2.2 三线阵测绘相机坐标系定义

三线阵测绘相机, 是由三个线阵 CCD 相机安装在同一个测绘基座上形成的相机。每台相机都有自己的坐标系。如图 2 所示,  $O_A$  为前视相机坐标系,  $O_B$  为正视相机坐标系,  $O_C$  为后视相机坐标系。坐标原点在各自 CCD 中心, 各相机 CCD 中心对应的视轴方向为  $Z$  轴, 正视相机  $+Z$  轴垂直对地, 前、后视相机  $+Z$  轴对地有一个固定的夹角 (称为交会角); 线阵 CCD 方向为  $Y$  轴, 与飞行方向垂直, 正视相机  $+X$  轴指向卫星相机飞行方向, 前后视相机  $X$  轴与自身  $Y, Z$  轴构成右手坐标系。

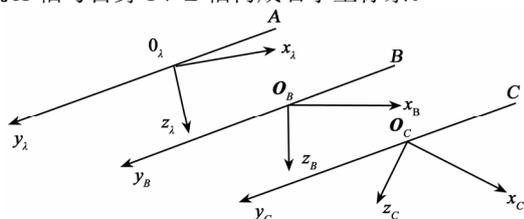


图 2 三线阵测绘相机坐标系示意图

Fig.2 Schematic of three-line array mapping camera coordinate system

## 2.3 三线阵 CCD 测绘相机装调要求

通过有关学者对影响卫星三线阵影像立体测绘精度的主要误差源分析<sup>[8-9]</sup>可以看出, 在卫星相机的研制过程中必须保证星上每台相机几何关系的精确性。

本文主要研究三线阵测绘相机之间的相互关系的装调问题, 以正视相机坐标系为基准进行描述。具体装调

要求如表 1 所示。

表 1 相机之间的几何关系

Table 1 Geometric relationships among cameras			
Camera	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Nadir	0	0	0
Forward	$0^\circ \pm 3''$	$+25^\circ \pm 5''$	$0^\circ \pm 5''$
Backward	$0^\circ \pm 3''$	$-25^\circ \pm 5''$	$0^\circ \pm 5''$

$\alpha$ -前、后视相机视轴  $Z$  与正视相机视轴  $Z$  在正视相机坐标系  $YOZ$  面内的夹角;

$\beta$ -前、后视相机视轴  $Z$  与正视相机视轴  $Z$  在正视相机坐标系  $XOZ$  面内的夹角;

$\gamma$ -前、后视相机 CCD 线阵方向与正视相机 CCD 线阵方向在正视相机坐标系  $XOY$  面内的夹角。

## 3 三线阵测绘相 CCD 像面的装调方法

### 3.1 实验室和配套设备要求

三线阵测绘相机要想达到高精度装调是一件很繁杂的工作, 建立高精度的设备和实验室是必不可少的条件。装调的主要设备有: 0.5" 二维转台、750 mm 口径自准直平行光管 (大于被装调设备口径 500 mm)、带有十字丝的自准直目镜、微光摄像机、监视器、隔振地基和光纤光源等组成。

#### a) 维转台

转台定位精度: 方位误差  $\leq 0.5''$  (极限误差), 俯仰误差  $\leq 0.5''$  (极限误差); 转台工作范围: 方位  $360^\circ$ , 俯仰  $360^\circ$ ; 工作台载荷 (有效):  $\geq 300$  kg。

#### b) 大口径平行光管

主镜材料采用德国肖特微晶玻璃, 光管焦距  $f=7500$  mm, 主镜面形精度:  $0.020 \lambda$  (rms, @633 nm),  $0.17 \lambda$  (PV, @633 nm), 系统波像差优于  $0.05 \lambda$  (rms, @633 nm)。

#### c) 气浮隔振平台

平台系统固有频率  $f \leq 2$  Hz, 2~100 Hz 范围台面振动速度振幅频域  $V_{rms} \leq 10 \mu\text{m/s}$ , 平行光管和二维转台放置在同一个气浮平台上。

此外还要建立恒温 (温度范围  $18^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , 4 h 温度变化小于  $0.5^\circ\text{C}$ ) 超净 (10 万级超净间) 实验室。

### 3.2 装调过程

本方法的工作原理是通过高精度的 0.5" 二维转台和带有十字丝的自准直目镜的大口径平行光管构成一个固定的坐标系, 在统一的坐标系下, 通过转动 0.5" 二维转台俯仰, 在三个不同位置对相机的 CCD 像面进行安装, 在保证每一个位置的安装精度的情况下即可保证三条线阵 CCD 像面的安装精度。三线阵相机装调装置示意图如图 3 所示。

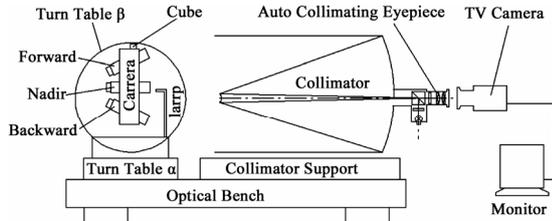


图 3 三线阵测绘相机装调装置示意图

Fig.3 Schematic of three-line array mapping camera alignment

装调前，应利用光学定心仪将三台相机镜头的光轴与 CCD 像面安装面修研垂直，误差小于 3"，同时利用 CCD 像面拼接仪将线阵 CCD 感光面与像面基板安装面修研平行，共面度小于 5 μm，保证相机全视场获得清晰的图像；而后将三个相机镜头安装固定到经过精细加工的测绘基座安装孔内，保证三个镜头的光轴安装误差在 5"以内，目的是保证 CCD 像面安装后相机的畸变符合设计要求，同时在测绘基座上安装立方镜，通过光学测量的办法使其坐标系与正是相机光轴和测绘基座底面构成的坐标系统一，安装精度小于 3"。

将自准直光管和高精度二维转台安放到气浮光学平台上，用 0.2"水平仪将二维转台调平到 0.5"以内，用 0.5"徕卡经纬仪、标准平面镜采用自准直的方法将光管调水平，二维转台的水平轴与光管光轴夹角 90°，误差小于 2"。这样二维转台的两轴与光管光轴构成装调直角坐标系。

将相机安装到高精度转台上，以基座立方镜为基准用事先制做的相机与转台的接口工装调整好相机相对转台位置，将立方镜坐标系与装调直角坐标系统一。

完成上述调整工作后，开始进行正视 CCD 像面的安装。将已准备好的像面机构用螺钉连接到正视相机镜头的安装面上，镜头前利用光纤光源照亮正视 CCD 像面，使正视 CCD 像面成像在平行光管的焦面上，通过摄像机和监视器将焦面十字丝和线阵 CCD 放大显示在监视器上。监视器图像显示示意图如图 4 所示。

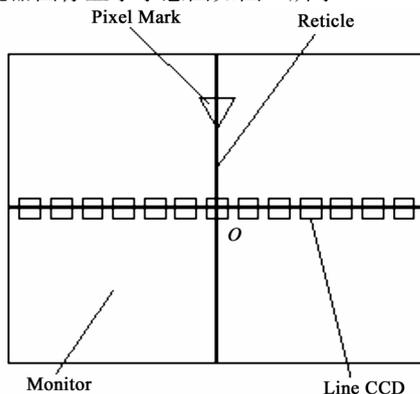


图 4 监视器图像显示示意图

Fig.4 Schematic of monitor display

目视观察自准直目镜十字丝与线阵 CCD 及中心像元标记的位置，通过转动二维转台的方位转动机构观察线阵 CCD 的方向是否水平，通过旋转将线阵 CCD 调水平，同时通过上下左右平移 CCD 像面基板将中心像元标记对应的线阵 CCD 像元中心和十字丝中心对准，上述工作需要多次小心谨慎进行，通过多次调整达到装调要求。最后固定像面基板，固定时要防止调整后的 CCD 像面基板有位移和旋转，封胶后完成正视 CCD 像面的装调。

前视 CCD 像面的安装。将二维转台沿俯仰向下转动固定的夹角 25°，将前视相机镜头对准大口径平行光管，将光纤光源移到前视相机镜头前面，将已准备好的前视 CCD 像面用螺钉连接到前视相机镜头的安装面上，采用与正视同样的方法完成前视 CCD 像面的装调。

后视 CCD 像面的安装。将二维转台沿俯仰向上转动固定的夹角 50°，将后视相机镜头对准大口径平行光管，将光纤光源移到后视相机镜头前面，将已准备好的后视 CCD 像面用螺钉连接到后视相机镜头的安装面上，采用与正视同样的方法完成前视 CCD 像面的装调。

通过上述的步骤即可完成三线阵测绘相机之间的几何关系的装调工作。

### 3.3 装调测试结果

按照上述的装调方法，我们完成了三线阵测绘相机 CCD 像面的装调，经过精密测试和解算，得到三线阵测绘相机之间的几何关系标定结果如表 2 所示；三线阵测绘相机畸变的标定结果如表 3 所示；三线阵测绘相机 MTF 的检测结果如表 4 所示。

表 2 相机之间的几何关系标定结果

Table 2 Calibration results of geometric relationships among cameras

Camera	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Nidar	0	0	0
Forward	1.7"	25°-2.9"	2.1"
Backward	1.2"	25°+3.8"	1.3"

表 3 相机的畸变标定结果

Table 3 Calibration results of camera distortion(μm)

Camera Field	Nidar Distortion	Forward Distortion	Backward Distortion
1ω	0.19	-0.35	0.08
0.9ω	0.28	-0.19	-0.34
0.8ω	0.10	0.44	0.03
0.7ω	-0.09	0.02	-0.37
0.6ω	0.14	-0.03	-0.56
0.5ω	-0.26	-0.66	-0.83
0.4ω	-0.11	-0.30	-0.33
0.3ω	-0.02	-0.39	0.02
0.2ω	0.24	-0.26	0.19
0.1ω	-0.24	0.47	0.16
-0.1ω	0.12	-0.43	-0.30
-0.2ω	-0.91	-0.64	-0.71
-0.3ω	-0.63	-0.92	-0.78
-0.4ω	-0.72	-0.25	-0.70
-0.5ω	-0.35	0.10	-0.61
-0.6ω	-0.13	-0.46	-0.19
-0.7ω	-0.07	0.22	-0.24
-0.8ω	-0.09	0.09	-0.09
-0.9ω	0.35	0.23	0.36
-1ω	0.75	0.98	0.37

表4 相机的MTF检测结果

Table 4 Results of camera MTF test(77 lp/mm)

Camera Field	Nidar MTF	Forward MTF	Backward MTF
1 $\omega$	0.21	0.22	0.21
0.85 $\omega$	0.22	0.22	0.21
0.7 $\omega$	0.22	0.23	0.22
0.5 $\omega$	0.23	0.23	0.22
0 $\omega$	0.23	0.24	0.22
-0.5 $\omega$	0.22	0.23	0.22
-0.7 $\omega$	0.22	0.22	0.21
-0.85 $\omega$	0.21	0.21	0.21
-1 $\omega$	0.20	0.21	0.20

### 3.4 装调检测结果分析

1)相机镜头光轴与CCD像面安装面修研垂直误差小于3",线阵CCD感光面与像面基板安装面平行度小于5 $\mu$ m,能很好保证每个相机成像清晰,也是十分必要的;

2)三个相机镜头安装固定到经过进细加工的测绘基座高精度安装孔内,保证三个镜头的光轴安装误差在5"以内,有效地保证CCD像面安装后相机的畸变小于1 $\mu$ m,符合测绘指标要求;

3)利用0.5"二维转台的两轴与光管光轴构成装调直角坐标系能够保证三台相机之间的几何关系达到 $\alpha \leq 3''$ 、 $\beta \leq 5''$ 、 $\gamma \leq 5''$ 的装调要求。

## 4 结 论

根据测试结果可以看出,该装调方法可以达到高精度的装调技术指标要求,我们在实际的三线阵CCD测绘相机研制中得到了很好的应用。该方法同样适用于其他线阵测绘相机的高精度装调要求。

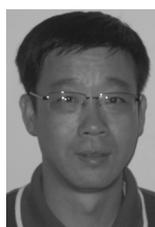
### 参考文献

- [1] 王景山. 空间科学与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001,7:96-98.  
WANG J S. Space science and applied[M]. Beijing: Science Press, 2001,7:96-98.
- [2] 焦斌亮,王朝晖,林可祥,等. 星载多光谱 CCD 相机研究[J]. 仪器仪表学报, 2004,25(2):146-147.  
JIAO B L, WANG Z H, LIN K X, et al. A Multispectral CCD camera for satellite use[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004,25(2):146-147.
- [3] 刘亚侠. 基于线阵 TDICCD 相机的辐射标定试验[J]. 仪器仪表学报, 2006,27(6):1192-1193.  
LIU Y X. Radiometric demarcation experiment based on the linear TDI CCD camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006,27(6):1192-1193.
- [4] 胡燕,胡莘,王新义,等. 偏流角对星载三线阵相机摄影

的影响[J]. 测绘科学, 2006,31(4):62-63.

- HU Y, HU X, WANG X Y, et al. The influence of drift angle on satellite photography of three-line array camera[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006,31(4):62-63.
- [5] 王冬,冯文灏,卢秀山,等. 基于多片空间后方交会的 CCD 相机检校[J]. 测绘科学, 2006:64-66.  
WANG D, FENG W H, LU X S, et al. CCD camera calibration based on space resection with multi-image [J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(4): 64-66.
  - [6] 扬秉新. 国外航天侦察相机和测绘相机发展概况[J]. 航天返回与遥感, 1998, 19(2): 16-24.  
YANG B X. The development survey of foreign space reconnaissance camera and mapping camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 1998, 19(2): 16-24.
  - [7] 刘金国,李杰,郝志航. 三线阵相机亚像元精度几何标定方法研究[J]. 光电工程, 2004,31(1):36-39.  
LIU J G, LI J, HAO Z H. Study on a geometric calibration method for three-linear-array CCD camera with sub-pixel accuracy[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(1): 36-39.
  - [8] 胡莘,曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测量精度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008,40(5):695-699.  
HU X, CAO X B. Analysis on precision stereo mapping microsatellite using three-line CCD images[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008,40(5):695-699.
  - [9] 王仁享. 我国无地面控制点卫星摄影测量综述[J]. 海洋测绘, 2008,28(5):2-8.  
WANG R H. Mapping satellite without control point in China[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2008, 28(5):2-8.

### 作者简介



吴国栋, 1987 年于天津大学获得工学学士学位, 现为中科院长春光学精密机械与物理研究所研究员, 主要研究方向为光学遥感器像质评价及测绘相机的几何标定技术研究。

E-mail: wuguodong586@163.com

Wu Guodong got B.S.degree from Tianjin University in 1987. He is a professor in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His main research field includes optical remote sensor image quality evaluation and mapping camera geometric calibration technology.