

多光谱成像仪几何特征标定技术研究*

王伟兴 郎小龙 姚 君

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 多光谱成像仪具有同目标多谱段信息获取的特点,因此在空间遥感领域占据很重要的位置。由于成像仪光学系统不可避免的存在几何畸变问题,会对获取地面目标信息的精度造成很大的影响,因此对于多光谱成像仪进行几何特征标定对于提升成像仪成像质量的有很大的作用。本文中应用标准网格板、自准直仪和高精度二维转台组合的几何特征标定方法,此方法具有测量原理简单、实验直观、标定结果可靠性高等特点。多次标定结果表明:主点标定精度优于 $5.2\ \mu\text{m}$,主距标定精度优于 $0.02\ \text{mm}$ 。满足实验要求。

关键词: 多光谱成像仪;几何特征;几何标定;自准直仪

中图分类号: TP949.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Study on geometric characteristic calibration of multispectral camera

Wang Weixing Lang Xiaolong Yao Jun

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

Abstract: With the character of the multispectral images to the same target, multispectral camera takes the important role in the remote sensing scopes. As the inevitable geometric optical distortion in the multispectral camera, which affect the obtained precision of the images of the ground target, the geometric characteristic calibration of the multispectral camera take the important effect on enhancing the quality of the images. The method adopts the geometric characteristic calibration with the standard gridding board, the autocollimation and high precision planar platform, this method has the strongpoint of the simple measuring elements, the intuitionistic experiment, and the high reliability in the result. Calibration results show that the focal calibration accuracy is less than $0.02\ \text{mm}$, the point calibration accuracy is less than $5.2\ \mu\text{m}$, and the method is fit for the request of the accuracy.

Keywords: multispectral camera; geometric character; geometric calibration; autocollimation

1 引言

国民经济各行业对精确地理空间信息的迫切需求,促使对地观测技术在国家信息化战略发展中的作用日益突出,这就对我国对地观测数据和信息产品的质量提出了更高的要求^[1-2]。对地遥感主要可以分为空间光学遥感和空间微波遥感两种主要手段^[3-4],其中空间光学手段由于其成像原理简单、信息获取直观、信息获取综合性强等特点,一直作为对地遥感信息获取首选的手段^[5]。

利用对地遥感技术优势获取观测目标可量化分析和准确描述的特征信息,一直也是遥感界持续追求并开展研究的主要目标,多光谱 CCD 成像仪作为对地遥感观测载

荷的一种,其主要的技术特点是利用不同遥感谱段获取同一目标图像信息,通过不同谱段图像信息的组合,获取诸如植被属性、地类属性、地质和水质属性、桥梁的材质、道路的铺面材料、岸滩的土质等地面目标主要物理属性^[6]。多光谱成像机几何特征标定能够在保证其具有测绘功能的前提下,提升对地目标信息获取的准确性

本文针对多光谱成像机几何特征标定问题进行研究,应用标准网格板、自准直仪和高精度二维转台组合的光学几何特征标定方法,确定多光谱成像仪主点和主距两个参数的畸变情况^[7-8],着重介绍多光谱成像机几何参数标定方法、标定设备及标定精度分析等,实验表明此标定方法满足指标要求。

收稿日期:2015-03

* 基金项目:国家 863 计划重点资助项目(2013AA122102)

2 多光谱成像仪简述

本次标定多光谱成像仪采用离轴三反光学系统,反射式光学系统最主要的特点是不产生色差,可以实现多光谱成像,满足各个波长严格的焦距一致性,不同谱段的各个视场不存在配准误差^[9-11]。光学系统共包括四块反射镜和一块折射镜,均采用微晶玻璃材料,折叠镜与三镜胶合形成一个光学组件。反射镜镀制高反射膜和保护膜,全谱段内平均反射率可以达到95%以上,峰值谱段超过97%以上。多光谱成像仪光学系统结构如图1所示。

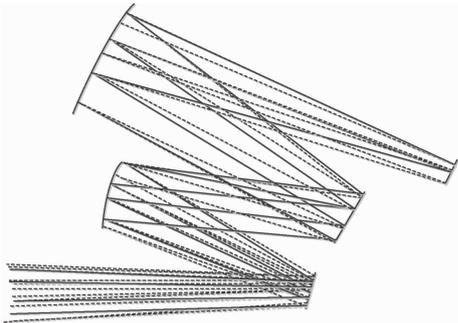


图1 多光谱成像仪光学结构

多光谱成像仪光学系统的主要参数如下:

- 焦距:65 mm;
- 入瞳:9 mm;
- 视场:61.93°;
- 成像谱段:蓝(420~520 nm)
- 绿(520~600 nm)
- 红(630~690 nm)
- 近红外(760~900 nm)

多光谱成像 CCD 焦平面由包含 4 条线阵 CCD 的一体化器件组成。光学窗口添加带通滤波片将 420~900 nm 以外的谱段截止。多光谱成像仪几何参数包括主点、主距和畸变等。

3 几何特征标定方法设计

国外实验室多采用平行光管和二维转台组合的测量方案,如德国柏林空间中心研究人员利用 DLR 系统对航空数字相机 ADS40 进行标定^[12];德国柏林空间中心研究人员利用标定设备对 MOSM-2P 进行标定^[13];日本东京大学研究人员对 TLS 航空相机进行标定^[14]。国内也多采用大口径平行光管和二维转台组成测量的标定方案。此方法具有精度高、标定原理简单等优点,但是使用此方法存在图像处理误差和 CCD 成像误差等缺点,为了得到更加精确的标定参数,根据多光谱成像仪的具体特点,本文中采用标准网格板、自准直仪和二维转台组合测量的标定方案。

3.1 标定系统组成

本文中标定系统如图2所示。系统主要由自准直仪、

高精度标准网格板(网格间隔精度 1 μm)、高精度单轴转台(测角精度 RMS0.3'')、转台控制系统和高稳定度光学平台组成。

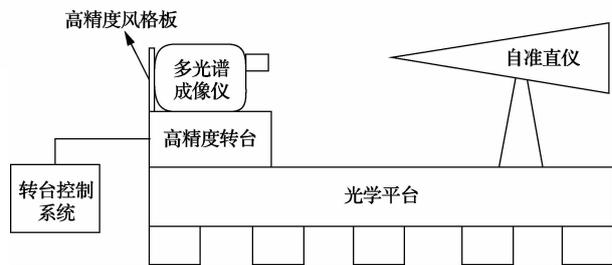


图2 多光谱标定系统组成

在标定时,首先将转台调平(调平精度优于 0.4''),其次将自准直仪调平,将装有网格板的成像仪安装到一维调整台上,通过一维调整台微调,通过自准直仪瞄准成像仪上网格板所成的像,将成像仪节点与单轴转台中心重合。使用自准直仪瞄准网格板两端刻度线和中心刻度线,通过平台转动角度判断网格板是否对准成像仪光轴。对准后将自准直仪指向网格板中心刻度线处,左右转动转台并通过自准直仪分别对准网格板上不同刻度线,记录角度值为 $\omega_i (i = 1, 2, 3)$ 。

3.2 标定数据解算

具体实验解算原理如图3所示,解算时,利用标靶上刻度值 h_i 和 ω_i ,采用最小二乘回归分析的方法^[15],使用公式如下:

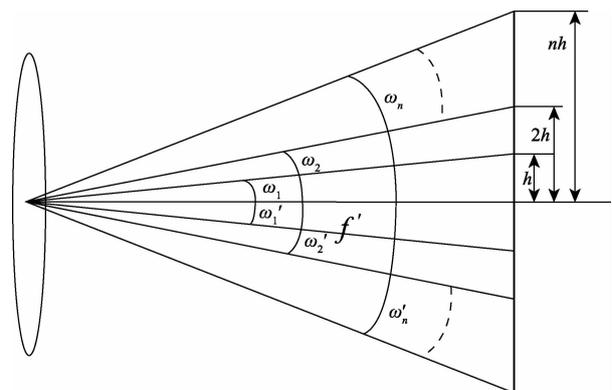


图3 多光谱标定系统组成

$$\tan(\omega_i \text{ 或 } \omega'_i) = \frac{i \cdot h}{f'} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$x_0 = f' \times \tan(\omega_i - \omega'_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

求解正规方程组得到主点 x_0 和主距 f' 的最佳估计值:

$$f' = \frac{h \sum n}{n \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2} \quad (3)$$

$$x_0 = \frac{f' \sum (\tan(\omega_i - \omega'_i))}{n} \quad (4)$$

各视场畸变:

$$D_i = f' \tan \omega_i - (x_0 + i \cdot h) \quad (5)$$

$$D'_i = f' - \frac{i \cdot h}{\tan(\omega_i - \omega'_i)} \quad (6)$$

主距测量方差:

$$\sigma_f^2 = \left[\frac{h \sum n}{n \cdot \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2} \right]^2 \cdot (\sigma_{\omega_i})^2 \quad (7)$$

$$\sigma_f^2 = \left[\frac{f'}{n} \sec^2(\omega_i - \omega'_i) \right]^2 \cdot [(\delta \omega_i)^2 + (\delta \omega'_i)^2] \quad (8)$$

3.3 标定精度分析

由于镜头的加工装配误差,畸变值常因沿镜头不同径向测量而有较为明显的变化。因此有必要沿几个径向进行测量,将测量值进行分析,从而给出像面上任意一点的畸变大小。本次多光谱成像机 CCD 为线阵成像,因此只针对于成像仪横向上多径向测量,具体测量精度分析如下:为了求取极限精度分析,其中定义 f 为成像仪实际焦距, y 为网格板刻度区间值, y' 为畸变值,将式(5)变形成为如下形式:

$$y' = y - f \tan \omega \quad (9)$$

利用公式 $f' = \frac{y}{\tan \omega}$ (其中 f' 为测量焦距)将式(6)进行变形如下:

$$y' = (f' - f) \tan \omega \quad (10)$$

畸变 y' 的测量误差为:

$$\sigma_{y'} = \pm \sqrt{(\sigma_{f'}^2 + \sigma_f^2) \tan^2 \omega + \left(\frac{f' - f}{\cos^2 \omega} \right)^2 \sigma_{\omega}^2} \quad (11)$$

上式(11)中可取 $\sigma_{f'} \approx \sigma_f$, 则:

$$\sigma_{y'} = \pm \sqrt{2\sigma_f^2 \tan^2 \omega + \left(\frac{f' - f}{\cos^2 \omega} \right)^2 \sigma_{\omega}^2} \quad (12)$$

将 $f' = \frac{y}{\tan \omega}$ 代入上式,而且 $\frac{f' - f}{\cos^2 \omega} \sigma_{\omega}$ 较 $\frac{f' \sigma_{\omega}}{\cos^2 \omega}$ 小得多,因此可以替换,故可得:

$$\sigma_{y'} = \pm 2 \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_y^2 + 2 \left(\frac{y}{\sin 2\omega} \right)^2 \sigma_{\omega}^2} \quad (13)$$

由上式可以看出,随着 y 增加, $\sigma_{y'}$ 也缓慢增加。

根据上式(13)的推导思路可得主点标定精度公式如下:

$$\sigma_{x_0} = \pm \sqrt{\left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tan \omega_1} - \frac{1}{\tan \omega_2} \right) \right]^2 d^2 f'^2 + \sqrt{\left[\frac{f'}{2 \sin^2 \omega_1} \right]^2 d^2 \omega_1 + \left[\frac{f'}{2 \sin^2 \omega_2} \right]^2 d^2 \omega_2}} \quad (14)$$

式中: ω_1 为顺时针最大角度值, ω_2 为逆时针最大角度值。

4 标定结果分析

使用自准直仪通过多光谱成像仪光学系统观测靶标刻度线,并将此时转台的绝对角度记录,反复多次测量提高准确精度,其中 1 组测量数据如表 1 所示(从零位顺时针转动观测得到第 1 条刻度线简称为顺 1)。

表 1 转台绝对角度测量数据

测量次序	1	零位角度值	357°13'35"
顺 1	2°11'15"	逆 1	352°16'10"
顺 2	7°9'5"	逆 2	347°17'30"
顺 3	12°8'45"	逆 3	342°17'25"
顺 4	17°10'10"	逆 4	337°15'
顺 5	22°14'40"	逆 5	332°9'20"
顺 6	27°22'55"	逆 6	326°59'25"

依据多次测量数据结果,代入相应公式计算可得,多光谱成像仪测量主距 $f' = 65.201$ (单位: mm),测量主点相对中心偏差值为 $x_0 = 0.087 2$ (单位: mm)。其中主距相对偏差量如图 4 所示。

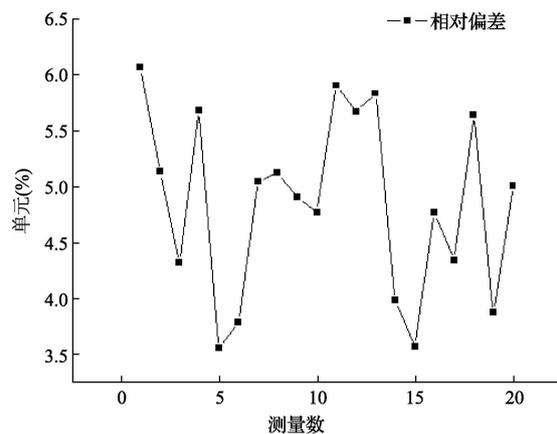


图 4 主距相对误差

根据主点畸变值结合多光谱成像仪 CCD 中心像素值得网格板上个刻度对应像素值如表 2 所示。(像素区间为 0~6 000,主点理论像素值为 3 000)

表 2 网格线对应像素值

刻度线	对应像素值	刻度线	对应像素值
顺 1	3 455	逆 1	2 532
顺 2	3 916	逆 2	2 070
顺 3	4 378	逆 3	1 609
顺 4	4 839	逆 4	1 147
顺 5	5 455	逆 5	532
顺 6	5 763	逆 6	224

对应推算像素值对应畸变值如表 3 所示。

表 3 网格线对应像素值 mm

像素值	畸变量	像素值	畸变量
3 455	0.337 7	2 532	0.347 2
3 916	0.596 8	2 070	0.573 9
4 378	0.613 5	1 609	0.596 9
4 839	0.310 7	1 147	0.277 3
5 455	1.607 2	532	1.460 8
5 763	-1.819 9	224	-2.065 3

根据上表可得出相应的畸变曲线如图5所示。

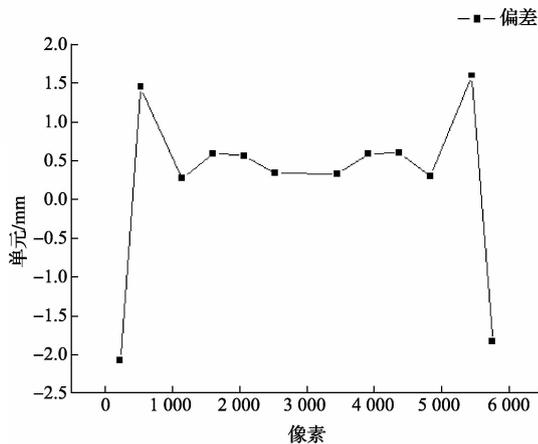


图5 畸变数值分布

由畸变数值分布图可知,畸变相对于像素中心点对称分布,越接近原理像素中心点畸变越大。

根据式(13)、式(14)计算主点和主距的畸变测量误差,具体计算数据如下:网格板半量程长度 $y=30\text{ mm}$,测量最大张角 $\omega=30^\circ$,网格板间距误差 $\sigma_y=1\ \mu\text{m}$,转台转角误差 $\sigma_\omega=0.3''$,顺时针转角最大值 $\omega_1=30.1556^\circ$,逆时针转角最大值 $\omega_2=30.2361^\circ$,主距计算值 $f'=65.2010\text{ mm}$, $d\omega_1=d\omega_2=0.3''$,通过计算可得:

主距标定测量误差 $\sigma_f=\pm 0.7\ \mu\text{m}$ 。

主点标定测量误差 $\sigma_x=\pm 0.26\ \mu\text{m}$ 。

5 结论

本文重点介绍了一种应用自准直仪、高精度网格板和二维转台组合的多光谱成像仪主点、主距的标定方法,依据标定原理设计实验方法,通过实验数据验证表明:主距的标定精度为 $\sigma_f=\pm 0.7\ \mu\text{m}$,主点的标定精度为 $\sigma_x=\pm 0.26\ \mu\text{m}$,满足于多光谱成像仪标定精度需求,标定结果在多光谱成像仪图像补偿起到了作用,提高了对地观测图像的质量。

参考文献

[1] 徐冠华,童庆禧.地球空间信息科学技术进展[M].北京:电子工业出版社,2009.

[2] 杨燕明,郑凌虹,文洪涛,等.无人机遥感技术在海岛管理中的应用研究[J].海洋开发与管理,2011,28(1):6-10.

[3] ROBINSON R K. Hyperspectral imaging on the international space station: an innovative approach to commercial development of space[J]. AIAA, 2004 (1314): 1-8.

[4] 石俊霞,李佩玥,郭永飞,等.航天遥感 TDI CCD 相机面阵成像模式的实现[J].国外电子测量技术,2014,33(5):97-101.

[5] 王峰,周峰,郑国宪,等.中国空间站光学遥感载荷的发展研究[J].航天返回与遥感,2010,31(5):27-31.

[6] 吴国栋.多光谱 CCD 相机几何标定技术研究[J].分析仪器,2013(6):57-61.

[7] 葛慧斌.单 CCD 四波段多光谱相机的几何标定的研究与实现[D].焦作:河南理工大学,2009.

[8] 冯文灏.近景摄影测量[M].武汉:武汉大学出版社,2002.

[9] 吴国栋.离轴三反光学镜头像面畸变的标定方法[J].光学精密工程,2008,16(11):2127-2131.

[10] MORETTO G. Off-axis systems for 4-m class telescopes[J]. Appl Opt, 1998, 37(16): 3539-3546.

[11] 林晶,崔庆丰.宽幅离轴三反光学系统研究[J].光学学报,2013,33(7):27-31.

[12] PACEY R E, WALKER A S, SCHEIDT M. Calibration of analog and digital airborne sensors at LH systems[C]. Proceedings of the 2007 ASPRS Annual Conference, 2007: 950-956.

[13] LEHNER M, WKORNUS W. Digital photogrammetric processing of MOMS-02/D2 imagery[J]. ISPRS Congress Commission 111/WG2, 2006 (7): 9-19.

[14] CHEN T, SHIBASAKI R, MORITA K. High precision georeference for airborne three-line scanner (TLS) imagery[C]. 3rd International Image Sensing Seminar on New Developments in Digital photogrammetry, 2008: 71-82.

[15] 王惠文,刘强.偏最小二乘回归模型内涵分析方法研究[J].北京航空航天大学学报,2010,26(4):473-476.

作者简介

王伟兴,1986年出生,工学硕士,研究实习员。主要研究方向为光电稳定平台控制与视轴稳定。

E-mail:w253443397@163.com

郎小龙,1962年出生,工学硕士,副研究员。主要研究方向为光电平台结构设计及检测工作。

姚君,1987年出生,工学硕士,研究实习员。主要研究方向为信号处理、嵌入式系统研发等。