

文章编号: 0253-2239(2010)12-3476-05

TDI-CCD 空间立体相机辐射定标研究

任焕焕^{1,2} 阮萍¹ 何建伟^{1,2} 薛彬¹ 乔卫东¹ 梁士通^{1,2} 王洪伟^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 陕西 西安 710119; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 分别从暗电流、相对定标、绝对定标三个方面详细介绍了某 TDI-CCD 空间立体相机的辐射定标原理, 简要描述了辐射定标过程, 并对所测量的数据进行了处理和分析, 其中主要分析了暗电流和相对定标的数据处理。暗电流作为一个直流分量, 为了有效地去除, 比较了处理暗电流的两种方法; 相对定标过程中, 经过大量的数据分析, 求得各个状态的定标矩阵, 并且在误差允许的范围内, 对这些定标矩阵进行了最优化, 得到一组对各种状态均适用的最优定标矩阵。经过验证, 用最优化矩阵处理任意一幅图像的平均偏差一般在 0.08~1.5 灰度值之间, 最大误差为 2.80%。从而在实际应用中降低了定标程序的复杂性, 也大大简化了后期图像的处理工作。

关键词 成像系统; 辐射定标; TDI-CCD; 相对定标; 暗电流; 空间立体相机

中图分类号 TP7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3476

Study of the Radiation Calibration of TDI-CCD Spatial Stereo Camera

Ren Huanhuan^{1,2} Ruan Ping¹ He Jianwei^{1,2} Xue Bin¹ Qiao Weidong¹
Liang Shitong^{1,2} Wang Hongwei^{1,2}

¹ Space Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The principle of the radiation calibration of TDI-CCD spatial stereo camera is introduced in detail in three aspects of dark current data, relative calibration and absolute calibration. Then the process of the radiation calibration is briefly described. Finally the data measured during the calibration is disposed and analyzed. How the dark current is eliminated effectively and the method of the relative calibration in each condition is mainly illustrated. In order to effectively eliminate the dark current, a part of the direct current, two methods are compared. In the process of relative calibration, the calibration matrices are calculated after analyzing a huge number of data. And in the tolerance of the system, the most suitable matrix to any condition is optimized among many matrices. It is proved that the average deviation of any calibrated image is usually between 0.08 and 1.5 in gray value, and the maximum error is 2.80%. So the complexity of the calibrating process is decreased in the practical application, and the image processing in the later stage of the work is also simplified.

Key words imaging systems; radiation calibration; TDI-CCD; relative calibration; dark current; spatial stereo camera

1 引言

传统的空间立体相机辐射定标一般包括相对辐射定标和绝对辐射定标, 相对辐射定标的目的是为了修正由于仪器的各种缺陷造成的时间延迟积分(TDI) CCD 像元响应的不一致性, 绝对辐射定标则是在相机的输出值与输入辐亮度之间建立一个定量的转换关

系^[1]。根据 TDI-CCD 本身的特性, 可以通过改变 TDI-CCD 的积分级数、视频放大器的增益以及曝光时间这三个因子来获得相机工作状态, 传统的相机定标一般只改变这三个因子中的一个或两个来实现定标^[2]。本相机为了适于在各种环境下工作, 必须在各种状态下均得到校正, 因此在实验中通过同时改变三个因子, 尽

收稿日期: 2010-01-18; 收到修改稿日期: 2010-04-21

作者简介: 任焕焕(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事机载与星载光学传感器定标等方面的研究。

E-mail: rhh198513@163.com

导师简介: 阮萍(1967—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事机载与星载光学传感器等方面的研究。

E-mail: ruanp@opt.ac.cn

可能多的模拟相机工作的各种状态,实现本次实验状态的遍历性,完成相机的标定工作。而这势必给定标工作带来了很大复杂性,因此还需要找到一种优化方法来克服这一困难。本文提出了一种优化筛选的方法,在误差允许的范围内解决了这一问题。

2 辐射定标原理

在一个光谱范围内,线阵 TDI-CCD 探测器的一个像元产生的电子数为^[2]

$$S_e(\lambda) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{\pi A_d}{4F^2} \frac{\lambda}{hc} \eta(\lambda) \tau_o(\lambda) T_{int} L(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中 $S_e(\lambda)$ 为探测器一个像元产生的电子数, A_d 为探测器像元面积, $F=f/D$ 为光学系统的 F 数, $\tau_o(\lambda)$ 为光学系统的透射率, T_{int} 为探测器的积分时间, $h=6.624 \times 10^{-34}$ Js 为普朗克(Plank)常数, $c=2.998 \times 10^8$ m/s 为光速, $\eta(\lambda)$ 为阵列器件的量子效率, λ 为窄带中心波长, $\Delta\lambda$ 为带宽; $\lambda/(hc)$ 为波长为 λ 的窄带内单位能量中的光子数, $L(\lambda)$ 为光学系统入瞳处的光谱辐亮度。在窄带内可以写为 $S_e = T_{int} R L$, 其中 R 为窄带内 CCD 的响应度。

一般在 TDI-CCD 相机的辐射定标实验中,都是通过改变相机的积分级数、放大器增益^[3]和曝光时间^[4]这三个因子中的一个或两个来调节 R , T_{int} 的值,本相机则同时利用了这三个因子来实现。其中积分级数分为 96, 64, 48, 32 和 16 级五种状态;增益分为 0.7, 1 和 2 倍三种状态;行频调整为最小、最优、最大三种状态(反映曝光时间)。每幅图像的状态为三因子的自由组合,更全面地实现了相机的各个状态。

线阵 CCD 的成像公式为 $s(x) = AG(x)L(x) + d(x)$ ^[5], 其中 A 为绝对定标系数, $G(x)$ 为灵敏系数, $d(x)$ 为暗电流噪声, 均与系统的各个状态有关; $s(x)$ 为相机图像灰度值, $L(x)$ 为目标实际辐亮度值, 因此定标实验实际是此公式的一个逆过程。在定标实验中,暗电流作为一个直流分量,对精度要求较高的遥感器在进行定标前一定要对每种状态进行暗电流处理。实验空间立体相机 TDI-CCD 的总像元数为 6144 pixel, 共分 12 个通道输出, 每个通道的输出为 512 pixel 像元的值, 且不同通道的 CCD 响应不同, 暗电流不同, 必须有效地去除。实验采用了两种方法处理暗电流, 即将 CCD 的 12 个通道分别取平均再处理或者是将 CCD 的 12 个通道直接处理。

TDI-CCD 相机相对定标的原理如图 1 所示^[6], 在不同的状态系统误差不同, 定标矩阵不同。在同一状态下利用 CCD 响应与目标辐亮度的线性关系, 推

出同一像元的输出灰度值与期望值成线性关系, 得到输出值与期望值的一个修正因子^[6]。建立一个发光均匀的面光源作为 CCD 相机的目标, 检查并记录每个像元的输出, 均值归一化为 1, 把冷、热像元的输出按均值归一化。例如有 4 个像元, 在相同的照度和曝光时间下, 其输出分别为: 60, 58, 56, 54, 经过相对定标后它们的修正因子分别为: 0.97, 1, 1.03, 1.07, 得到相对定标矩阵^[6]。

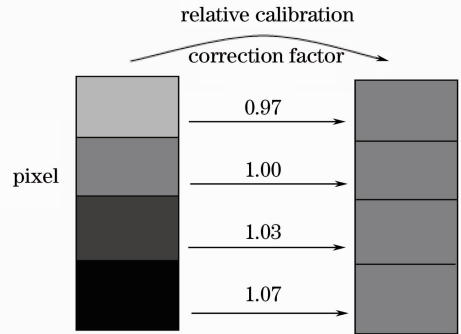


图 1 相对定标示意图

Fig. 1 Sketch map of the relative calibration

TDI-CCD 相机的绝对定标, 实际上是在平场修正后的 CCD 像元输出 (S') 和目标的辐亮度 (L) 间建立定量的关系: $S' = aL + b$ 。通过改变积分球内标准灯的点亮数目来控制积分球输出的辐亮度, 并且在积分球内设置了具有很好线性度响应的硅探测器, 用来监控积分球辐亮度。通过硅探测器的读数和相机相对定标后的期望值之间的线性关系, 便可以得到相机的绝对定标矩阵。在不同的状态, CCD 响应不同, 定标矩阵不同。

采用的定标设备主要由积分球^[7]、光谱辐亮度计^[8]、标准灯、标准白板组成, 这些设备均需在实验室定标前进行校验。另外目标在最大辐亮度条件下, 还要使 TDI-CCD 立体相机在最短曝光时间下的原级输出接近于器件的最大饱和输出, 这样可以最大限度地利用相机的动态范围。

实验数据处理一般包括归一化系数法、两点法、最小二乘法, 本实验采用的是最小二乘法, 对每个像元进行标定获得定标矩阵, 最后利用平均标准差法获得相对定标的精度。

3 实验过程及数据处理

3.1 实验主要步骤

实验中, 暗电流、相对定标和绝对定标所需数据是同时获得的。如图 2, 3 所示^[9]。步骤如下:

1) 调节积分级数、增益、行频状态, 在没有光输入情况下, 让 TDI-CCD 及电子学线路部分工作, 得到整机暗电流输出。

2) 每次增加 2 个灯照明, 分别记录光谱辐射度计的读数及 CCD 相机的输出, 直至增加到 20 个灯照明或像元输出饱和为止。

3) 改变相机的工作状态, 重复步骤 1) 和 2)。

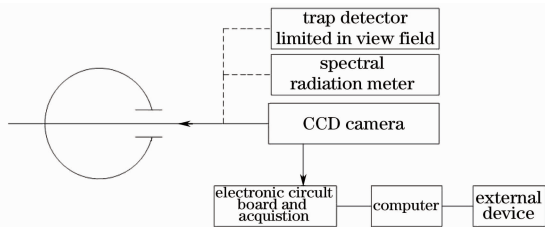


图 2 TDI-CCD 空间立体相机相对辐射定标流程图

Fig. 2 Flow chart of the radiation relative calibration of the TDI-CCD spatial stereo camera

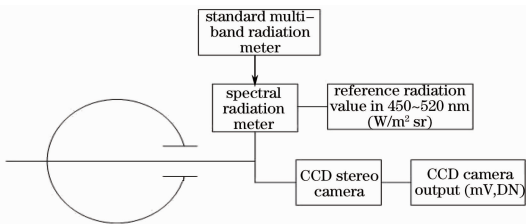


图 3 TDI-CCD 空间立体相机绝对辐射定标流程图

Fig. 3 Flow chart of the radiation absolute calibration of the TDI-CCD spatial stereo camera

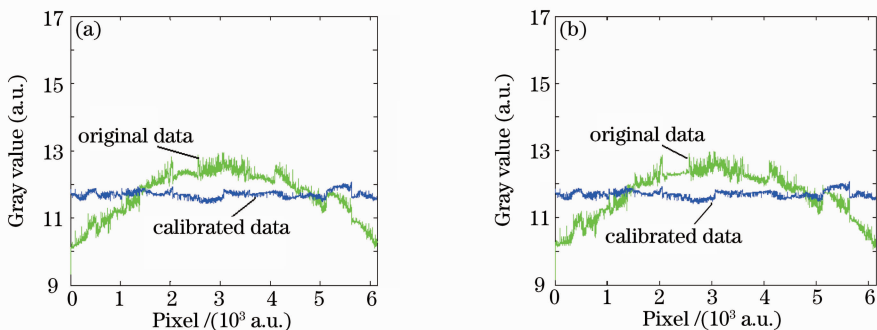


图 4 不同暗电流处理定标前后效果对比。(a)采用方法一定标前后,(b)采用方法二定标前后

Fig. 4 Effect comparison between before and after calibration when dark current was processed in different ways.

(a) Comparison in the first way, (b) comparison in the second way

3.3 相对定标数据处理及分析

3.3.1 相对定标矩阵

以每行数据的平均值作为期望值, 在不同辐亮度条件下对于固定像元, 每个输出值对应一个期望值, 且具有一致的比例系数, 可以通过最小二乘拟合

3.2 暗电流数据处理

根据 TDI-CCD 的特点, 每幅图像为线阵 CCD 扫描 512 行的结果, 可写为 512×6144 矩阵, 将其取平均得到一行数据。据分析 CCD 暗电流输出的 12 个通道值略有不同, 利用各个通道的暗电流均方差值来表征其误差的大小, 平均值和均方差公式分别为

$$\bar{a}_i = \sum_{n=1}^{512} a_i(n) / 512 (i = 1, 2, \dots, 6144), \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{11} \sum_{i=j \cdot 512 + 1}^{j \cdot 512} (A_j - \bar{a}_i)^2}{6144}};$$

$$A_j = \frac{\sum_{i=j \cdot 512 + 1}^{j \cdot 512} \bar{a}_i}{512} (j = 0, 1, \dots, 11). \quad (3)$$

在级数为状态 1, 增益为状态 1, 行频为状态 1 (可简称为 js1zy1hp1, 后面图表中也用简写表示) 时, 暗电流的均方差为 0.0557 个灰度值, 若采用 2 个灯照射, 以不同的方式处理暗电流结果如图 4 所示。1) 图像的平均值行直接减去暗电流的平均值行; 2) 图像的平均值行的 12 个通道分别减去各自通道的暗电流平均值。原理上前者更精确, 因为即使在同一个通道内, 各个像元的响应也不会很一致。由于定标本身的效果很好, 且有 512 行数据取平均得到平均值行, 从图像上没有很大的差别, 均适用。

得到。处理所有像元后得到一组 1×6144 的定标系数矩阵。

在 js1zy1hp1 状态下, 以两个灯照射的数据为例, 其定标前后如图 5 所示, 可见定标后图像变得很平滑。



图 5 定标前后效果对比。(a)定标前，(b)定标后

Fig. 5 Comparison between the original image and the calibrated image. (a) Before calibration, (b) after calibration

用曲线表示,如图 6 所示,经过相对定标后,其值在 0.7 个灰度范围内波动。偏差表征为: $h_{MSE} = \sqrt{\sum_{j=1}^{6144} (y_j - f)^2 / 6144}$, 式中 y_j 为拟合后图像每个像元点的值, f 为图像的期望值, 计算结果为 0.1055, 平均偏差在 0.1 个灰度值附近, 效果很好^[1]。

况下为 3 个灰度值, 影响不是很大。因此可计算出最优矩阵的最大误差为 2.80%, 在相对定标误差要求 4% 以内, 符合要求。

表 1 行频为状态一时的优化过程

Table 1 Process of the optimization in the first condition of line frequency

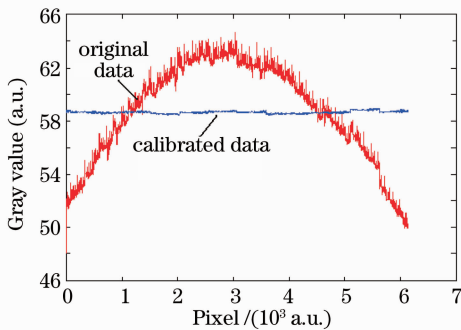


图 6 原始图像与相对定标后图像的单行数据对比

Fig. 6 Comparison between a single line of the original data and that of the calibrated data

| State | Result 1 | Result 2 |
|---------------|---------------|---------------|
| hp1; zy1; js1 | hp1; zy1; js2 | hp1; zy3; js2 |
| hp1; zy1; js2 | | |
| hp1; zy1; js3 | | |
| hp1; zy1; js4 | | |
| hp1; zy1; js5 | | |
| hp1; zy2; js1 | hp1; zy2; js4 | |
| hp1; zy2; js2 | | |
| hp1; zy2; js3 | | |
| hp1; zy2; js4 | | |
| hp1; zy2; js5 | | |
| hp1; zy3; js1 | hp1; zy3; js2 | |
| hp1; zy3; js2 | | |
| hp1; zy3; js3 | | |
| hp1; zy3; js4 | | |
| hp1; zy3; js5 | | |

表 2 5 种行频状态的定标矩阵平均偏差比较

Table 2 Average deviation of the calibrating matrix under the five conditions of line frequency

| State | V_{warp} |
|---------------|------------|
| js2; zy3; hp1 | 0.1657 |
| js3; zy1; hp2 | 0.1858 |
| js3; zy1; hp4 | 0.1782 |
| js2; zy2; hp5 | 0.1839 |
| js1; zy2; hp6 | 0.1875 |

3.3.2 相对定标矩阵优化分析

表 1 为行频为 1 状态 (hp1), 对定标矩阵的优化流程图。先对级数进行优化: 在增益一致的情况下, 将不同级数状态的 5 幅图像进行归一化, 使每幅图像的灰度值在相同的量值水平内, 分别用每一个定标矩阵去处理这 5 种级数的图像, 比较得出平均偏差最小的那组矩阵, 得到结果 1。然后进行增益优化: 不妨选级数 1 状态的 3 幅图像归一化, 利用结果 1 中的每个定标矩阵分别去处理这 3 幅图像, 比较得出平均偏差最小的那组矩阵为结果 2。

3.4 绝对定标数据处理

同理, 在 hp2, hp4, hp5, hp6 状态时重复上述步骤, 结果如表 2 所示, 其中 V 为对应定标矩阵的平均偏差, 比较得到 js2zy3hp1 状态定标矩阵为最佳定标矩阵。由于 hp3 状态的图像容易达到饱和, 线性状态不是很好, 故不再考虑。最后经过验证, 用最佳矩阵去处理任意一幅图像的平均偏差在 0.08~1.5 灰度值之间, 在极少数接近饱和情况下为 6 个灰度值。若用任意状态矩阵去处理相应图像的平均偏差在 0.08~0.5 灰度值之间, 在极少数接近饱和情

在一种状态下, 采用每幅图像的期望平均值来与已知的辐亮度进行拟合, 得到一组 2×1 的绝对定标系数。任一状态的绝对定标误差为

$$u = \frac{D_m - (aL_m + b)}{D_m} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 D_m 为辐亮度条件为 m 时, 相机 CCD 的输出值; a, b 为输出值随辐亮度变化曲线进行最小二乘拟合的系数; L_m 为辐亮度条件为 m 时的辐亮度。

利用(4)式计算出任一状态的绝对定标误差在0.02%~4.95%,在绝对定标误差要求5.5%以内^[10],符合要求。同理,在所有状态下得到一个 2×90 的矩阵。

4 结 论

介绍了 TDI-CCD 空间立体相机辐射定标原理、过程及数据处理,重点对两种暗电流处理方法和相对定标矩阵进行了分析。根据系统的结构特性,在相对定标前将 CCD 的 12 个通道分别取平均再处理和整体做处理,分析后得出这两种方法处理暗电流效果都很好,理论上后者精度更高。在相对定标过程中,采用最小二乘法,对图像进行修正。最后将各种状态的定标矩阵经过大量的数据处理进行分析,在误差允许的范围内得出一个适用于各种状态的相对定标矩阵,从而解决了实际应用过程中状态的多样性的问题,很大程度上降低了定标后期数据处理的复杂程度。

参 考 文 献

- Hu Yongfu, Zhang Yufeng. Analysis of relative radiometric calibration accuracy of space camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2007, **28**(4): 054~057
胡永富, 张宇峰. 空间相机相对辐射定标精度分析[J]. *航天返回与遥感*, 2007, **28**(4): 054~057
- Liu Yaxia. Research on the laboratory radiometric calibration of the TDI-CCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(5): 071~075
刘亚侠. TDI-CCD 相机实验室辐射定标的研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(5): 071~075
- He Weiji, Chen Qian, Qu Huiming *et al.*. Charge multiplication of CCD based on electrons multiplication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1161~1166
何伟基, 陈 钱, 屈惠明 等. 电子倍增 CCD 的电荷倍增特性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1161~1166
- Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Wen Desheng *et al.*. Design and on-orbit measurement of Chang'e-1 satellite CCD stereo camera [J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, **18**(1): 030~036
赵葆常, 杨建峰, 汶德胜 等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机的设计与在轨运行[J]. *航天器工程*, 2009, **18**(1): 030~036
- Ding Xiaohua, Li You, Yu Qifeng *et al.*. CCD noise calibration and its application in edge location[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~104
丁晓华, 李 由, 于起峰 等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 99~104
- Wang Jue, Li Chunlai, Zhao Baochang. The laboratory radiometric calibration of the CCD stereo camera for the optical payload of the optical payload of the lunar explorer project[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2007, **04**(1): 030~035
王 珏, 李春来, 赵葆常. 绕月探测工程 CCD 立体相机的实验室辐射定标[J]. *天文研究与技术*, 2007, **04**(1): 030~035
- Li Wei, Zhan Jie, Shao Shiyong *et al.*. Development of hemispherical instrument for sky brightness [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **28**(10): 1844~1848
李 威, 詹 杰, 邵士勇 等. 一种半球形天空亮度测量仪器的研制[J]. *光学学报*, 2009, **28**(10): 1844~1848
- Wang Xianhua, Qiao Yanli, P. Goloub *et al.*. Radiometric calibration of sunphotometer system applied to aerosol robotic network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 87~91
王先华, 乔延利, P. Goloub 等. 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计辐射定标系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 87~91
- Yang Zhaojin, Wang Lei, Fang Jihong. Space Optical Equipment & Calibration and Testing Technology [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2009, 51~55
杨照金, 王 雷, 范纪红. 空间光学仪器设备及其校准检测技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2009, 51~55
- Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun *et al.*. Optical radiometric calibration based on parametric down-conversion effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2325~2329
李健军, 郑小兵, 卢云君 等. 基于参变下转换效应的光辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2325~2329