

大面阵彩色 CCD 航测相机成像非均匀性校正

修吉宏 黄 浦 李 军 李友一

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 以某型大面阵彩色电荷耦合器件(CCD)航测相机为研究对象,通过分析其成像过程的各个环节,提出引起相机成像非均匀性的各个因素,并根据分析结果提出光学系统引起的照度差异是导致相机成像非均匀性的主要原因。通过实验室内辐射定标的方法,完成相机暗电流噪声、成像非均匀程度及像元响应度的检测。非均匀性度量结果表明,图像中各彩色像元成像非均匀性均比较严重,尤其是红色像元达到 17%,必须予以校正。响应度检测结果显示,相机 R、G、B 颜色通道各个像元的响应度在工作波段范围内均呈线性变化趋势,但中心区域像元响应度明显高于边缘区域。通过分析各像元点响应特性的分布规律,提出基于辐射响应特性的非均匀性校正方法,获取各像素点的反演辐射亮度并依据反演辐射亮度的变化,分区域选取进行校正曲线拟合的像素集合。利用最小二乘法获得拟合校正曲线,并对大面阵彩色 CCD 航测相机的地面成像图像进行了非均匀性校正,其校正效果优于传统的两点校正法。非均匀性度量结果表明,校正后积分球图像的非均匀性降低到 4.3% 以下,其中红色通道像元非均匀性降低到 1.79%,可满足工程实践要求。

关键词 图像处理;航测相机;辐射定标;非均匀性校正;大面阵

中图分类号 TP391; TN386.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0711003

Non-Uniformity Correction of Large Area Array Color CCD Aerial Mapping Camera

Xiu Jihong Huang Pu Li Jun Li Youyi

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract All kinds of factors which affect the non-uniformity of a large area array color CCD aerial mapping camera are presented through analyzing the process of camera imaging. According to the analysis results, the differences in illumination of optical system are the main causes for the non-uniformity of camera imaging. The detections and measurements of the dark current noise, imaging non-uniformity and the pixel response are completed through the laboratory radiometric calibration method. The non-uniformity measurement results show that the non-uniformity of each color pixel is serious, especially that of the red pixel reaches 17%, which must be corrected. The detection results of responsivity indicates that the radiometric responsivity of each pixel for R, G and B color channel varies linearly in working spectral range, but the responsivity of pixel in the central area is significantly higher than that of the edge region. By analyzing the distribution of each pixel response characteristics, the non-uniformity correction method based on radiation response characteristic is put forward. Retrieval radiance of each pixel is computed, and according to the variation of radiance, assemblage of pixels which are used to fit the correction curve are selected sub-regionally. The calibration curve is required by using the method of least squares fitting, then the image taken on the ground by area array color CCD camera is corrected, and the correction is better than the traditional two-point calibration method. The measurement results of the non-uniformity show that, after correction, the non-uniformity of integrating sphere image decreases to 4.3% or less, wherein the non-uniformity for red channel pixel is reduced to 1.79%, which can meet the requirements of engineering practice.

Key words image processing; aerial mapping camera; radiometric calibration; non-uniformity correction; large area array

OCIS codes 120.0280; 040.1520; 250.0040; 100.2550

收稿日期: 2012-10-31; 收到修改稿日期: 2013-01-07

基金项目: 国家 863 计划(2009AA7010102)资助课题。

作者简介: 修吉宏(1976—),女,博士,副研究员,主要从事航空成像与测量等方面的研究。

E-mail: xiujihong0809@yahoo.com.cn

1 引 言

航空测绘是对地表自然地理要素或人工设施的形状、大小和空间位置等信息进行测定和采集,并对其属性进行表述及处理的一种地面探测方法,其测绘数据的获取一般通过航测相机完成。为了提高测绘效率,同时保证测绘精度,要求航测相机成像的地面覆盖范围宽、图像畸变小,且亮度适中、对比度高,因此,航测相机通常采用多像元数的面阵型电荷耦合器件(CCD)探测器。同时考虑到人眼辨别彩色色调比灰色色调的能力更强,选用全色或 Bayer 阵列形式的彩色 CCD 探测器。由于成像视场大,除像元之间响应的不一致性会对成像均匀性造成影响外,光学系统所引起的照度分布不均也会严重影响成像的均匀性。成像不均匀性会影响到成像质量,进而影响测量的准确性,因此必须加以校正。

在非均匀性校正过程中,由于像元数规模较大,导致数据处理量庞大,且彩色 CCD 中 R、G、B 各类像元的光电响应特性并不相同,为避免产生色偏,必须按色彩分别处理,这些都增加了大面阵彩色 CCD 相机成像均匀性校正的难度。目前国内针对成像非均匀性校正的研究多在红外探测波段^[1~4],而在可见光波段,多是针对时间延迟积分(TDI)型 CCD 探测器进行的非均匀性校正研究^[5~7]。对于大面阵 CCD 相机,尤其是彩色 CCD 相机非均匀性校正方法的研究不多,刘妍妍等^[8]对可见光面阵单色 CCD

探测器进行了非均匀性校正,由于检测到探测器的响应呈线性变化趋势,采用传统的两点校正法即获得了较好的校正效果。Lasarte 等^[9]对彩色数码相机进行了非均匀性校正研究,并着重分析积分时间和增益对非均匀性校正精度的影响。上述文献均侧重于对探测器自身的响应特性影响因素进行校正,没有从相机整体角度考虑光学系统镜头等因素进行非均匀性分析和校正,也没有明确提出针对彩色 CCD 探测器各类色彩像元响应不一致性所采取的校正方法。

本文从相机成像模型出发,分析相机产生非均匀性的各类因素,并采用实验室内辐射定标的方法获取某大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射响应特性,通过分析其各像元点响应特性的分布规律,提出基于辐射响应特性的非均匀性校正方法,并对大面阵彩色 CCD 航测相机地面成像图像进行了非均匀性校正,其校正效果优于传统的两点校正法。

2 相机成像非均匀性产生机理分析

图 1 为相机成像过程,地面物体的入射光能量经大气、光学镜头和快门系统照射到 CCD 芯片上,由探测器内部光电转换组件、信号驱动及处理电路处理后输出。通过以上成像环节可以发现,在忽略大气环境条件影响的条件下,像元输出的图像灰度值主要受以下因素影响。

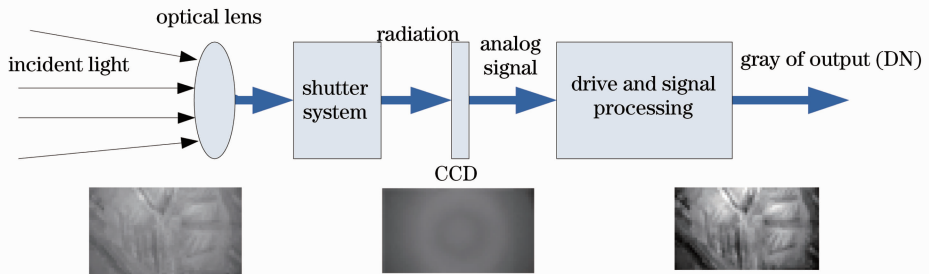


图 1 相机成像过程

Fig. 1 Process of image formation of camera

1) 相机光学系统的影响

光学系统在传输能量的过程中,不可避免地会造成光能量的损失,导致像面亮度低于物面亮度。光学系统轴上像点与轴外像点的照度满足如下关系:

$$E_M = E_0 \cos^4 \omega, \quad (1)$$

式中 E_M 为轴外像点的光照度, E_0 为轴上像点的光照度, ω 为光学系统半视场角。

随着视场的增大,像点照度降低较多。因此,为满足大面阵成像要求而设计的大视场光学系统会导

致轴上与轴外像点光照度差异较大。此外,光学系统镜头的加工精度、探测器单元相对光轴的偏离角度^[7]等因素也会影响探测器的响应输出。

2) CCD 器件固有特性的影响

由于 CCD 本身的结构材料和制造工艺等的局部差异性,造成 CCD 各个像元对光的灵敏度和感光有效面积不同,同时也决定了 CCD 器件暗电流、散粒噪声等固定模式噪声的强弱,表现为各像素对于相同的辐照度产生的灰度值并不相同。相机采用基

于 BAYER 阵列形式的彩色 CCD 探测器, R、G、B 像元光电响应特性差异较大, 表现为对同样的辐射输入量输出灰度值存在偏差, 在进行非均匀性校正时必须根据色彩分量分别进行处理。

3) CCD 驱动与处理电路的影响

CCD 驱动与处理主要包括 CCD 时序驱动、信号放大处理及模/数(A/D)采集处理等电路。为保证数据输出的快速性, CCD 输出通常采用多通道数据输出方式, 供电电压、时序输出延时、放大器参数、A/D 采集量化噪声、数据传输电缆质量以及电路板差异均会造成 CCD 各个像点最终输出数据的差异。

根据以上分析, 相机最终输出的图像灰度值(DN)是受入射辐亮度、光学系统、CCD 光电转换及电子学系统等因素影响的多元函数, 根据文献[10], 其值可表示为

$$V_{DN} = \frac{\pi A_d \tau_0 L(\lambda) t \cos^4 \omega}{4F^2} R(\lambda) G + N, \quad (2)$$

式中 A_d 为 CCD 像元探测器面积, F 为相机的相对孔径数, ω 为像元同光学系统轴上点的角度偏差, τ_0 为光学系统透过率, $L(\lambda)$ 为入射光的辐亮度, t 为曝光时间为 $R(\lambda)$ 为 CCD 探测器像元的光谱响应函数, G 为 CCD 增益放大系数, N 为 CCD 光电转换过程中的暗电流噪声、读出噪声、量化噪声及光子散粒噪声等。

根据(2)式, 曝光时间、CCD 增益放大系数、像元的光谱响应函数和噪声的不一致性及光学系统能量损失的差异均是引起相机成像非均匀性的原因。而由于视场较大, 光学系统引起的照度差异会造成中心视场像元输出灰度值高于边缘视场, 是引起相机成像非均匀性的主要原因。

3 成像非均匀性度量及检测

考虑到影响相机成像非均匀性的因素众多, 难以将各个因素分离后进行独立分析, 只能考虑各个因素综合作用后对相机成像均匀性的影响。因此, 首先对相机成像非均匀性的程度进行检测, 不仅可以了解其非均匀性的严重程度, 而且可以根据检测结果合理选择校正方法。

3.1 非均匀性度量及检测方法的选取

对成像非均匀性的度量方法包括两种: 基于任务的度量方法和基于客观计算公式的度量方法。由于基于任务的度量方法往往带有某种程度的主观性, 因此较少采用。基于计算公式的度量方式有多种^[8,11]。采用标准方差的度量方式可表征相机输出

值相对于均值的离散程度, 更能刻画相机成像的非均匀性程度^[7], 因此本文选用基于标准方差的度量方法, 其定义为: 各像元在二分之一饱和曝光量条件下各自输出信号与平均值之差的均方根值与平均值之比。非均匀性(NU)的数学表达式为

$$V_{NU} = \frac{1}{V_{Avg}} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{ij} - V_{Avg})^2} \times 100\%, \quad (3)$$

式中 V_{Avg} 为 CCD 像元平均值, V_{ij} 为单个像元灰度值。

根据文献[12], 采用辐射定标的方法可以获得每个像元的响应度函数, 通过比较各个像元响应度函数的差异, 可检测相机成像非均匀性的程度。

在实验室内采用积分球对大面阵彩色 CCD 相机进行辐射定标^[13,14], 确定各个像元点入射辐亮度和最终灰度值输出之间的定量关系。实验设备包括积分球、光谱辐亮度计、图像采集卡及用于处理数据的计算机, 如图 2 所示。

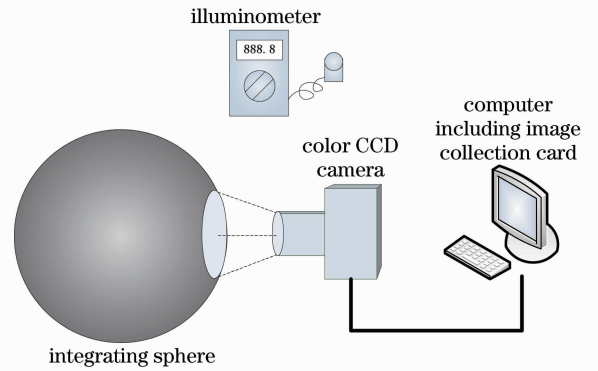


图 2 积分球辐射定标过程

Fig. 2 Process of radiometric calibration using integrating sphere

针对(2)式, 令 $A = \frac{\pi A_d \tau_0 R(\lambda) G t \cos^4 \omega}{4F^2}$, 根据

文献[15]中的理论分析及文献[16]中的最终实验拟合结果, 每个像元的响应度函数均可用下面的表达式表示

$$V_{DN} = A_0 + A_1 L(\lambda) + A_2 L^2(\lambda) + \dots + A_N L^N(\lambda), \quad (4)$$

式中 V_{DN} 为 CCD 输出的图像灰度值, A_0 为以暗电流为主导的 CCD 探测器噪声, A_1, \dots, A_N 为辐射校正系数。

选取 n 组不同的入射辐亮度, 可组成多个测量方程, 已知图像输出值 V_{DN-i} ($i = 1, 2, \dots, n$)、入射辐亮度 L_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 和暗电流噪声 A_0 , 当满足 $n > N$, 即可解出各个像元的辐射校正系数 A_i ($i = 1, 2, \dots,$

n)^[5,7], 进而获得像元的响应度函数。

3.2 暗电流噪声的检测

由(2)式可知, 噪声 N 是 CCD 探测器本身的成像非均匀性因素, 其中暗电流噪声是主要的噪声源, 同输入辐亮度无关, 因此可在无光照条件下, 对暗电流噪声进行检测, 进而将这一非均匀性影响因素同其他因素进行分离。在实验室暗场条件下, 保持温度恒定, 经过多帧图像测量取均值后, 可标定相机每个像元的暗电流噪声情况。

在暗场并保证温度变化范围为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下进行暗电流测试, 图 3 为 CCD 探测器增益为 3, 积分时间为 $1/250\text{ s}$ 时像元的暗电流输出情况, 限于 Matlab 软件的显示方法, 仅列出行列均为 $1 \sim 1000$ 时各像元暗电流输出值。从图中可以看出, 各个像元暗电流输出值差异不大。经过计算, 全部像元的 NU 值为 113%。考虑到图像噪声是引起成像非均匀性的原因之一, 为进一步提高非均匀性校正的精度, 在应用特定处理算法对图像进行非均匀性校正之前, 应首先进行噪声因素去除, 需要注意的是, 根据文献^[10, 17]的研究成果, 暗电流噪声随积分时间和 CCD 增益参数会发生变化, 因此, 在进行噪声去除时, 应采用相同探测器参数条件下标定的暗电流噪声参考值。

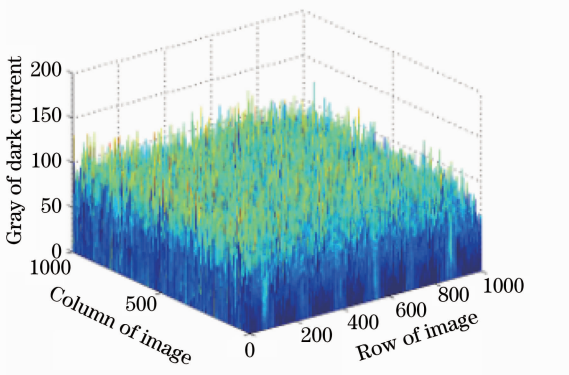


图 3 增益为 3, 积分时间为 $1/250\text{ s}$ 时的暗电流输出值
Fig. 3 Dark current under the condition that CCD gain is 3rd gear and the integration time is $1/250\text{ s}$

3.3 成像非均匀程度检测

采用积分球在 10 个不同辐亮度下对相机进行辐射定标, 图 4 为积分球输出均匀辐亮度为 $6.798\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$, CCD 增益为 3, 曝光时间为 $1/250\text{ s}$ 时的图像, 从图中可以看到, 图像中心存在明显的亮带, 均匀性较差。根据前面章节所述的非均匀性度量方法, 在相同探测器参数条件下, 10 个辐亮度下的非均匀性度量值如表 1 所示。从表中数

据可以看出, 红色像元响应度高, 因此其成像非均匀性受各种因素影响较其他色彩严重, 达到 17% 左右, 蓝色像元响应度最低, 其成像非均匀性为 9% 左右。图像中各彩色像元成像非均匀性均比较严重, 必须予以校正。

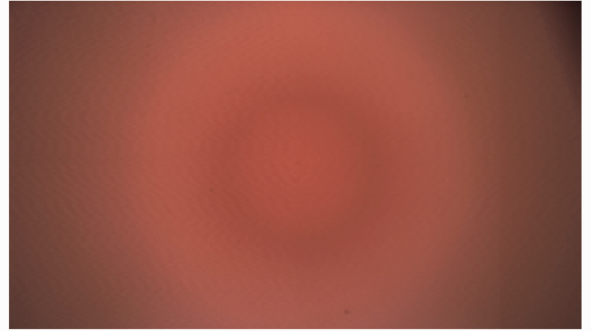


图 4 入射辐亮度为 $6.798\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 的积分球成像图像

Fig. 4 Integrating sphere image which incident radiance is $6.798\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$

表 1 各个积分球输出辐亮度下的相机成像非均匀性度量值
Table 1 Non-uniformity measure results of the camera imaging in the various integrating sphere output radiance conditions

No.	Incident radiance / $[\text{W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)]$	Image non-uniformity of each color component (NU) / %		
		R	G	B
1	9.050	14.17	12.03	8.84
2	7.755	17.22	12.03	8.82
3	6.798	17.86	12.04	8.89
4	5.848	17.73	11.98	8.98
5	5.028	17.58	11.96	9.04
6	4.497	17.42	12.02	9.14
7	3.797	17.25	12.07	9.33
8	3.242	17.09	12.10	9.57
9	2.647	16.82	12.19	9.86
10	2.140	16.62	12.41	10.40
Remarks		CCD gain is 3rd gear and the integration time is 4 ms		

3.4 像元响应度检测

根据积分球定标结果, 采用最小二乘法对单个像元的响应度函数进行拟合。考虑到像元数规模较大, 只能列出部分像元的响应度函数。将单帧像元尺寸 $4096\text{ pixel} \times 7168\text{ pixel}$ 划分为 9 个区域, 分别为左上(1区)、中上(2区)、右上(3区)、左中(4区)、中(5区)、右中(6区)、左下(7区)、中下(8区)、右下(9区)。每个区域分别取 R、G、B 各一个像元为例绘图, 其响应度图像如图 5 所示。结果发现, 每个像元响应度函数的线性度较好, 中心区域响应度明显

高于边缘区域,这同前面的理论分析一致,主要是受光学系统影响所致。此外,R、G、B 像元响应度差别较大,红色像元响应度最高,绿色其次,蓝色最低,这同探测器提供的响应度曲线一致。在辐亮度大于

7.755 W/(sr·m²)时,中心区域红色像元已接近饱和,因此,在进行非均匀性校正时,不可选择辐亮度大于该值的图像作为校正参考图像。

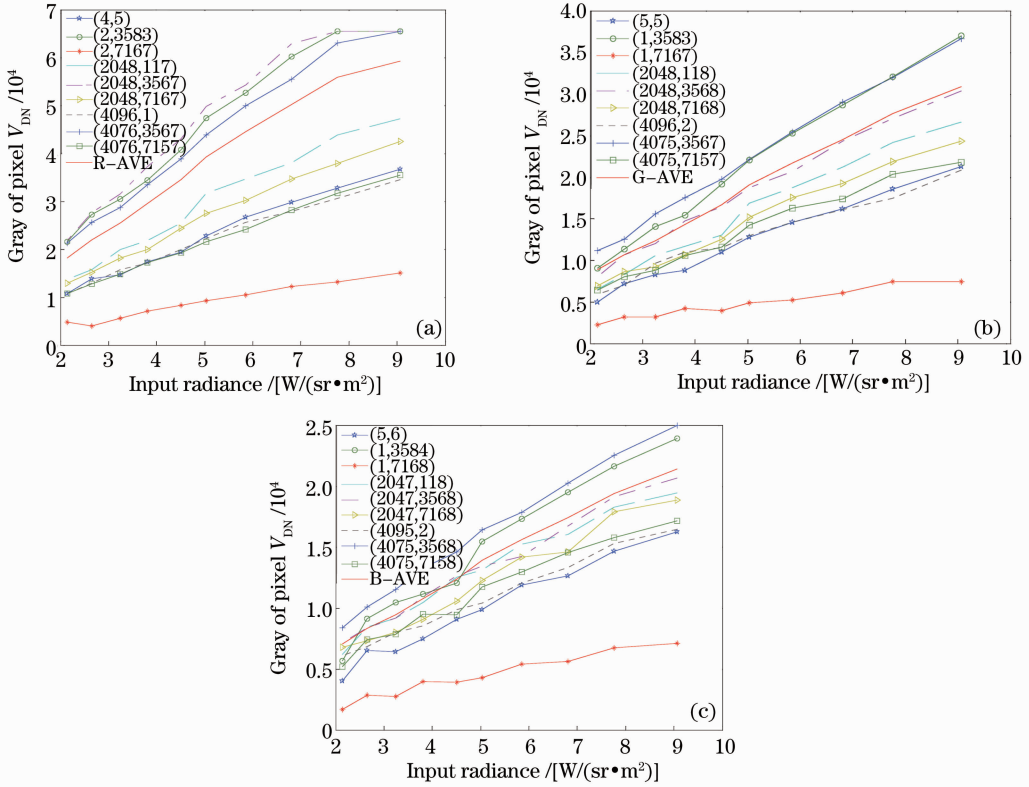


图5 各个区域任选像元的拟合响应度函数。(a)红色像元;(b)绿色像元;(c)蓝色像元

Fig. 5 Fitting response functions for the random pixel in various regions. (a) Red pixels; (b) green pixels; (c) blue pixels

4 相机成像非均匀性校正

4.1 典型非均匀性校正算法

非均匀性校正算法主要有基于场景和基于辐射源定标两类算法^[18],基于场景的非均匀性校正算法由于算法复杂、计算速度慢等原因在工程实践中应用较少。基于辐射源定标的算法需要通过辐射源提供均匀辐射,然后根据采集到的均匀辐射图像,计算校正参量。该类算法计算量小,便于工程实现。

目前基于辐射源定标的算法常见的主要有一点校正法、两点校正法和多点校正法等。一点校正算法只对各个像元的偏移量进行补偿,当目标的辐亮度偏移定标点时,空间噪声很大,校正范围很小。多点校正算法精度高但比较复杂,实现起来困难较大。工程中最常用的是两点校正法及其改进算法,两点校正算法对像元的偏移量和增益均进行校正,

对具有线性响应的像元响应曲线可以取得很好的校正效果。两点校正法的改进算法继承了两点校正法的优势,将具有非线性响应的像元响应曲线拟合为多段线性曲线的集合后,根据分段情况分别运用两点校正算法,可对成像非线性响应曲线取得较好的校正效果。

4.2 两点校正算法及其校正效果分析

图6为大面阵彩色 CCD 相机地面成像图像,从图像中可以看到,图像非均匀性较严重,尤其是图像中心亮度远高于边缘亮度。根据非均匀性检测结果,相机各个像元输出响应的线性度较好,因此,可以采用两点校正算法对图像进行校正。

两点校正原理如图7所示,其校正算法如下:已知积分球在辐亮度分别为 l_1 和 l_2 的图像,对于任一像元点 (i, j) ,其在辐亮度为 l_c 条件下所拍照图像的校正后像素灰度值为



图 6 相机地面成像图像

Fig. 6 Photograph taken by camera on the ground

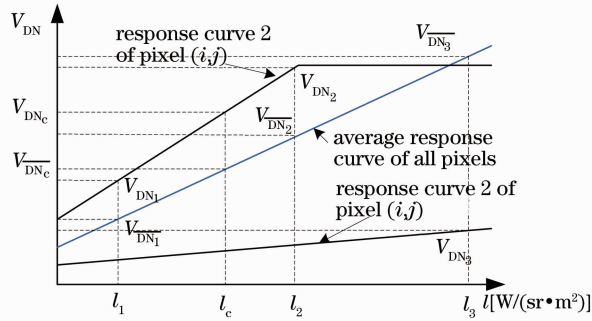


图 7 两点校正算法原理

Fig. 7 Principle of two-point correction algorithm

$$\bar{V}_{DN_c} = \left(\frac{\bar{V}_{DN_2} - \bar{V}_{DN_1}}{V_{DN_2} - V_{DN_1}} \right) (V_{DN_c} - V_{DN_1}) + \bar{V}_{DN_1}, \quad (5)$$

式中 $\bar{V}_{DN_1}, \bar{V}_{DN_2}$ 为积分球参考图像对应的图像平均灰度值; V_{DN_1}, V_{DN_2} 为积分球参考图像各像元对应的图像灰度值, V_{DN_c} 为待校正图像各像元对应的图像灰度值。

辐射定标结果表明, Bayer 阵列中 R、G、B 各个色彩分量的像元响应差异较大, 当响应度最低的 B 像元达到一定灰度级别时, R 像元可能已达到或接近饱和, 因此在使用辐射定标数据进行校正的过程中, 选取了积分球输出辐亮度均不会导致各个像元的输出响应达到饱和状态的图像作为参考图像。同时, 为保证校正后图像的插值效果, 避免色彩失真, 在进行两点校正时, 将各像元按色彩分量分解为各自独立的矩阵分别进行处理。经过两点校正后的图像如图 8 所示, 图像均匀性校正效果较好, 校正后图像视场中心同边缘的亮度差异明显减小, 图像亮度适中, 但其右上角图像出现严重饱和现象。

分析两点校正法的实现原理可以发现, 该方法选取未出现饱和像元的最大和最小输入辐射量图像作为参考图像, 将其像元平均灰度值进行线性拟合后作为理想校正曲线, 当像元间非均匀性差异较小

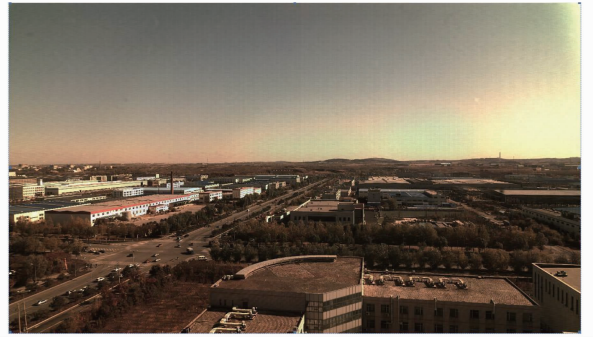


图 8 采用两点校正算法校正的相机地面成像图像

Fig. 8 Image of camera corrected using two

point correction algorithm

时, 可以取得良好的效果。而对某些同校正曲线响应度偏离较大的像元, 当待校正图像的某些区域入射辐亮度大于或小于参考图像时, 则会造成对应区域校正后的像元输出值过大或过小, 如图 7 中 V_{DN_3} 点所示。该方法取输入辐照度差异尽可能大且未出现图像饱和现象的 2 幅积分球图像, 将其像元平均灰度值进行线性拟合后作为理想校正曲线, 当像元间非均匀性差异较小时, 可以取得良好的效果。而对某些同校正曲线响应度偏离较大的像元, 当待校正图像拍照时某些区域入射辐亮度大于或小于参考图像时, 则会造成对应区域校正后的像元输出值过大或过小, 如图 7 中 V_{DN_3} 点所示。根据像元响应度测定结果, 由所有像元的平均值拟合出的响应度函数同某些区域像元的偏差较大, 尤其是同图像右上角区域(3 区)差异较明显。加之图 6 所示图像为上午拍照的地面景物图像, 太阳从右侧照射, 其右上角图像入射辐亮度高于其他区域图像, 即出现图 7 中 V_{DN_3} 所示情形。两点校正法采用图像均值曲线作为最终校正函数, 最终导致图像边缘(右上角)出现饱和现象, 如图 7 中 V_{DN_3} 。因此, 如何选取合适的校正曲线是决定相机最终校正效果的关键, 既要获得良好的校正效果, 尽可能消除相机各个成像非均匀性因素对原始地面景物辐射量造成的偏差, 以反映地面景物真实辐射量值, 又要保证各个像元值不能过大或过小, 校正图像不能存在曝光过度或不足现象。

4.3 基于辐射定标数据的校正算法及校正效果

由辐射定标结果可知, 各个像元的响应度函数基本呈线性变化趋势, 因此, 其输出灰度值可表征为

$$V_{DN}(i, j) = A(i, j)L(i, j) + A_0(i, j). \quad (6)$$

根据(2)式, 当探测器增益和曝光时间一定时, $A(i, j)$ 和 $A_0(i, j)$ 为固定值, 此时像元输出灰度值

同图像辐亮度参数之间存在一一对应关系,因而根据像元灰度值不仅可反演出对应的图像辐亮度参数 $L(i, j)$, 也可获知某一像元灰度值达到饱和时其对应的最大辐亮度参数。以不出现像元饱和为原则, 求解各像元接近饱和时对应的辐亮度参数并依此作为分段依据, 随辐亮度的增加, 按区域选取图像中的像素进行均值处理, 进而选取进行校正曲线拟合的一组像素集合, 最终拟合出校正曲线。具体步骤如下:

1) 选取两幅辐亮度差异较大但均未出现饱和像元的积分球图像作为参考图像, 求取每个像元对应反演辐亮度, 并组成辐亮度反演矩阵, 任一像元对应的 $L(i, j)$ (以下简称 L) 表达式为

$$L = \frac{L_2(V_{DN} - V_{DN_1}) - L_1(V_{DN} - V_{DN_2})}{V_{DN_2} - V_{DN_1}}, \quad (7)$$

式中 L_1, L_2 为积分球参考图像对应的入射辐亮度, V_{DN_1}, V_{DN_2} 为积分球参考图像各像元图像灰度值, V_{DN} 为待校正图像各像元对应的图像灰度值。

2) 选择理想校正曲线

在入射亮度较低时, 以中心点区域 1 的像元不饱和为原则, 选取整幅图像灰度平均值作为校正点, 当到达中心点像元接近饱和时所对应的亮度后, 以靠近中心区域的四个区域像素均值作为校正点, 以此类推, 当这些区域的像元接近饱和时, 选取最边缘区域的像元平均值作为校正点。这种选取方法尽可能遵循区域像元的真实响应度, 且当输入辐亮度较高时, 也可避免低响应输出的边缘区域像元出现饱和现象。将上述所选取的校正点的集合采用最小二乘法进行曲线拟合, 最终拟合出的校正曲线如图 9 所示。拟合表达式为

$$\begin{cases} V_{DN_R} = 0.7616L^3 - 56.18L^2 + 2210L + 15200 \\ V_{DN_G} = 0.3649L^3 - 25.29L^2 + 894L + 10950 \\ V_{DN_B} = 0.2176L^3 - 13.9L^2 + 738L + 8403 \end{cases} \quad (8)$$

3) 求取校正图像中各点灰度值, 并获得最终校正图像

根据(7)式及步骤 2) 中计算出的辐亮度反演矩阵, 获得校正后图像各点输出灰度。

采用本文所提出的算法对实验室某积分球图像进行校正, 校正前及校正后图像如图 10 所示, 目视观察, 图像中心的环形亮带完全消失, 校正效果良好。采用标准方差的度量方式对校正效果进行评估, 校正前后非均匀性比较如表 2 所示, 各色彩通道

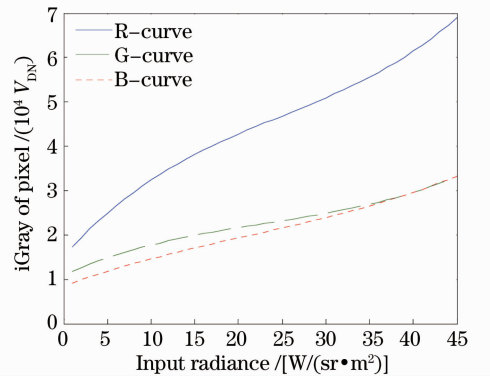


图 9 本文算法的校正曲线

Fig. 9 Calibration curve of the proposed algorithm

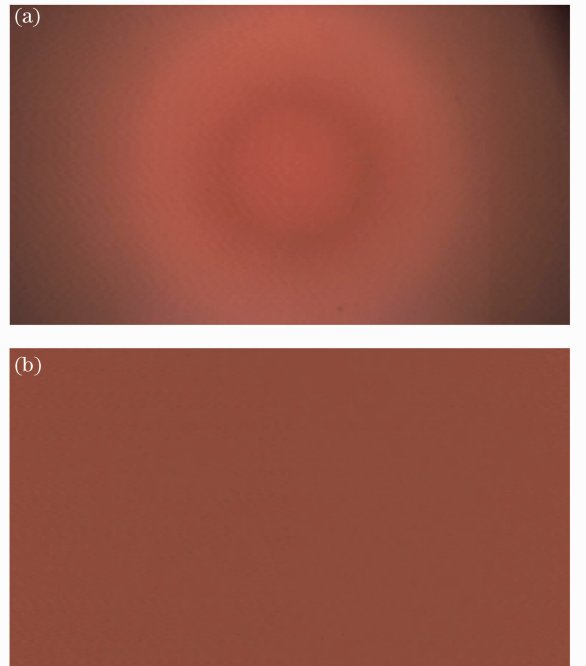


图 10 校正前图像及运用本文算法的校正后图像。

(a)校正前图像; (b)校正后图像

Fig. 10 Image before and after correction using the proposed algorithm. (a) Before correction; (b) after correction

的非均匀性均显著减小。其中 R 通道的校正效果最好, 其成像非均匀性由校正前的 17.58% 减少到 1.79%, 说明该校正算法对实验室内积分球图像可取得较好的校正效果。

对图 6 所示相机地面成像图像运用本文校正算法进行校正, 校正后图像如图 11 所示, 可以看到, 同两点校正算法相比, 图像中心的不均匀亮带进一步弱化, 且图像右上角饱和现象明显减少, 其校正效果优于两点校正法。

表 2 校正前和校正后积分球图像非均匀性度量值

Table 2 Non-uniformity measure results of integrating sphere image before and after correction

No.	Stage	Image non-uniformity of each color component (NU) / %		
		R	G	B
1	Before correction	17.58	11.96	9.04
2	After correction	1.79	3.25	4.30

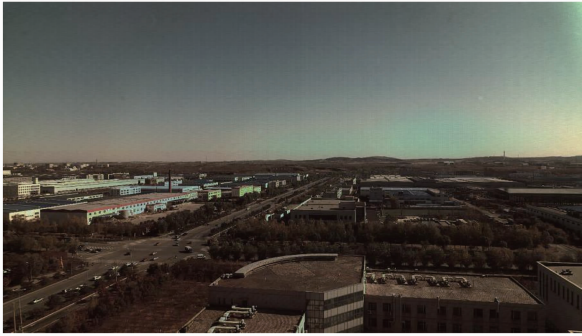


图 11 本文校正算法获得的校正图像

Fig. 11 Image corrected using the proposed algorithm

5 结 论

大面阵彩色 CCD 航测相机由于视场较大,使得光学系统引起的像面照度差异严重影响相机成像的均匀性,导致中心区域像元响应度明显高于边缘区域。根据实验室内辐射定标数据,对相机成像非均匀程度及像元的响应度进行了检测,获得 R、G、B 各通道像元响应度曲线,并得出各像元响应度在光谱范围内呈线性变化的结论。基于以上结论,结合各像元点响应特性及其反演辐亮度的分布规律,提出基于辐射定标数据的非均匀性校正算法,对进行校正曲线拟合的像素集合采取分区域选取的原则并采用最小二乘法获得拟合校正曲线。对相机地面成像图像的非均匀性校正结果表明,本文提出的算法的校正效果优于传统的两点校正法。非均匀性度量结果表明,校正后积分球图像的非均匀性降低到 4.3% 以下,其中红色通道像元非均匀性减低到 1.79%,可有效提高航空测量的准确性。

参 考 文 献

- Hong Wenqing, Yang Nansheng, Wang Xiaodong *et al.*. Combined nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0611005
洪闻青, 杨南生, 王晓东等. 红外焦平面联合非均匀性校正算法 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0611005
- Lai Rui, Yang Yintang, Wang Bingjian *et al.*. S-curve model-based adaptive algorithm for nonuniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 927~931

- 赖睿, 杨银堂, 王炳键等. 一种基于 S 曲线模型的红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 927~931
- Huang Yingdong, An Jianbo. A nonuniformity correction algorithm for IRFPA based on improved polynomial fitting [J]. *Infrared*, 2011, **32**(3): 29~33
黄英东, 安建波. 基于改进多项式拟合的红外焦平面非均匀性校正方法 [J]. *红外*, 2011, **32**(3): 29~33
- Zuo Chao, Chen Qian, Gu Guohua. Nonuniformity correction based on unified photoresponse characteristics of infrared focal plane arrays [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 926~932
左超, 陈钱, 顾国华. 基于焦平面归一化响应特性的红外非均匀性校正 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 926~932
- Ren Huanhuan, Ruan Ping, He Jianwei *et al.*. Study of the radiation calibration of TDI CCD spatial stereo camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3476~3480
任焕焕, 阮萍, 何建伟等. TDI CCD 空间立体相机辐射定标研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3476~3480
- Wang Wenhua, He Bin, Han Shuangli *et al.*. Real time correction of nonuniformity in CCD imaging for remote sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(6): 1420~1428
王文华, 何斌, 韩双丽等. 星上 CCD 成像非均匀性的实时校正 [J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(6): 1420~1428
- Liu Yaxia. Research on the Calibration Technique of the TDI CCD Remote Sensing Camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005
刘亚侠. TDI CCD 遥感相机标定技术的研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005
- Liu Yanyan, Li Guoning, Zhang Yu *et al.*. Detection and correction of response non-uniformity based on visible light area CCD [J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2010, **25**(5): 759~763
刘妍妍, 李国宁, 张瑜等. 可见光面阵 CCD 响应非均匀性的检测与校正 [J]. *液晶与显示*, 2010, **25**(5): 759~763
- Marta de Lasarte, Jaume Pujol, Montserrat Arjona *et al.*. Optimized algorithm for the spatial nonuniformity correction of an imaging system based on a charge-coupled device color camera [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(2): 167~174
- Xiu Jihong, Huang Pu, Li Jun *et al.*. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(6): 1366~1373
修吉宏, 黄浦, 李军等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标 [J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(6): 1366~1373
- Li Zhihua. The Artificial Neural Networks Technique Applied to the Nonuniformity Correction of the Infrared Focal Plane Array [D]. Baoding: Hebei University, 2004
李志华. 红外焦平面非均匀性校正的人工神经网络算法 [D]. 保定: 河北大学, 2004
- Quan Xianrong, Li Xiansheng, Ren Jianwei *et al.*. Nonuniformity correction of TDI CCD camera based on radiation luminance revises [J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2011, **26**(3): 379~383
全先荣, 李宪圣, 任建伟等. 基于辐射亮度反演的 TDI CCD 相机的响应非均匀性校正 [J]. *液晶与显示*, 2011, **26**(3): 379~383
- Zhang Chunlei, Xiang Yang. Accuracy analysis of imaging spectrometer radiometric calibration using standard detector-diffuser method [J]. *Laser & Opto Electronics Progress*, 2011, **48**(6): 061101
张春雷, 向阳. 成像光谱仪标准探测器-漫反射板定标法准确性分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 061101
- Yang Xiaohu, Wang Shurong, Qu Yi *et al.*. Research of UV spectral radiance characteristics of the integrating sphere based on

- calibration by the absolute radiance radiometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1008007
- 杨小虎, 王淑荣, 曲艺等. 基于绝对辐亮度计定标的积分球紫外光谱辐射特性研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1008007
- 15 Ren Jianwei, Wan Zhi, Li Xiansheng *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(8): 1186~1190
- 任建伟, 万志, 李宪圣等. 空间光学传感器的辐射传递特性与校正方法 [J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(8): 1186~1190
- 16 Ralf Widenhorn, Justin C. Dunlap, Erik Bodegom. Exposure time dependence of dark current in CCD imagers [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2010, **57**(3): 581~587
- 17 Ralf Widenhorn, Ines Hartwig, Justin C. Dunlap *et al.*. Influence of illumination on dark current in charge-coupled device imagers[J]. *J. Electronic Imaging*, 2009, **18**(3): 033015
- 18 Yan Yi, Hong Jingxin, Wang Wenyong. The study of adapted by oneself non-uniformity correction algorithm in infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(9): 521~523
- 颜益, 洪景新, 王文颖. 对红外焦平面非均匀性自适应校正算法的研究[J]. *红外技术*, 2008, **30**(9): 521~523

栏目编辑: 何卓铭