

几何量测量所用 CCD 的辐射标定

刘 军 左 勇 赵 静

(中国航空工业集团北京长城计量测试技术研究所长度研究室, 北京 100095)

摘要 为了提高当前几何量非接触成像测量的测量精度,需要对 CCD 的辐射特性进行标定和校准。阐述了 CCD 辐射标定应用于成像测量领域的原理及其必要性,设计了标定实验,建立了 CCD 相机输入辐射照度与灰度输出值之间的定量关系,并求得 CCD 相机的补偿函数。实现了在规定不确定度范围内的 CCD 辐射度标定和校准。

关键词 测量;电荷耦合器件;辐射标定;灰度补偿

中图分类号 TB92 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s108009

Radiation Calibration of CCD Applied to Dimensional Measurement

Liu Jun Zuo Yong Zhao Jing

(Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China)

Abstract In order to improve the accuracy of non-contact imaging measurement, it is rather essential for people to identify the radiation calibration of charge-coupled device (CCD). This article explains the theory and necessity of radiation calibration in the field of non-contact imaging measurement through an experiment in which the quantitative relationship between the radiation intensity of illumination at the surface of CCD and the digital of gray value is built, resulting in the penalty function of the camera. Consequently, the radiation calibration of CCD has been accomplished within the limits of the prescriptive uncertainty.

Key words measurement; charge-coupled device; radiation calibration; gray compensating

OCIS codes 120.3940; 120.5630

1 引 言

在几何量测量领域,随着被测工件的特性越来越多种多样,对非接触成像测量的需要越来越迫切。为了进一步提高测量精度,CCD 相机探测器的辐射标定作为成像测量系统不可或缺的一步,其作用越来越重要。

CCD 相机的辐射标定是指确定相机的输出信号幅值与达到相机 CCD 探测面处的辐射照度之间的定量关系,即确定相机的辐射响应特性^[1]。当前大多图像处理算法是建立在传感器收集的能量和图像灰度值之间存在线性关系这一事实基础之上的,关系式为 $G = aE + b$,其中 E 是传感器积累到的能量, G 是图像上的灰度值。理想情况下, $b = 0$,即输

出灰度值为输入能量的倍数关系。但是, $b = 0$,对于测量的准确度来说不是必须的,只需要响应是线性的即可。如果响应是非线性的,会使图像灰度平移,边缘位置改变,不能真实地反映被测物体,从而导致一些算法结果的准确度降级。

当前 CCD 辐射标定技术主要应用于航天领域星载成像系统的 TDI CCD 相机^[2]。在成像计量领域,由于以前测量精度要求不高等因素,使得该领域的 CCD 探测器大多未经辐射标定直接进行相机内外参数校准,用于成像测量。由于测量精度进一步的提高,使该方法逐渐不能满足测量精度的要求。尤其是随着亚像素精度级别图像处理的应用越来越广泛,如果不进行辐射标定将出现原理性错误。因

收稿日期: 2013-10-23; **收到修改稿日期**: 2013-11-15

基金项目: 国防军工计量“十一五”科研计划(J052009B002)

作者简介: 刘 军(1986—),男,硕士研究生,助理工程师,主要从事几何量方面的研究。E-mail: liujunbit@163.com

导师简介: 左 勇(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事几何量方面的研究。E-mail: hit99335@163.com

此在成像计量应用辐射标定技术意义重大。

成像测量设备的应用在实验室环境,因此对于相机要求的曝光时间及辐射照度能够很好地满足,进行辐射照度标定的意义不仅在于对探测器性能的评价^[3],更在于对其能量响应的补偿,即为 CCD 探测器的灰度值校准。

因此,本文阐述了 CCD 探测器的响应模型,分析了辐射标定的原理,设计了辐射标定实验,通过对数据的处理得出了相机在确定工作条件之下的能量响应函数,并求得能量响应函数的补偿函数,即为逆响应函数。分析最终结果的不确定度,通过逆响应运算得到了 CCD 探测器能量响应的线性输出结果,即完成了 CCD 相机的辐射标定以及其校准。

2 辐射响应模型

在忽略大气环境条件的影响之下,相机最终输出的图像灰度值(DN)是受入射辐照度、光学系统、CCD 光电转换以及电子学系统因素影响的多元函数^[4]。入射光经光学系统滤光片、光学镜头及快门系统后照射到 CCD 芯片上,则 CCD 像面处的辐射能为

$$Q_e(\lambda) = \frac{\pi A_d L(\lambda) \tau_0 t}{4F^2}, \quad (1)$$

式中 A_d 为 CCD 探测器面积, F 为相机的相对孔径数, τ_0 为光学系统透射率, $L(\lambda)$ 为入射光的辐射照度, t 为曝光时间。

CCD 经过光电转换、数值转化后输出灰度值 D_N , 该灰度值包含了各类 CCD 噪声、电路噪声以及环境影响,其可表示为

$$D_N = \frac{\pi A_d \tau_0 L(\lambda) t}{4F^2} R(\lambda) G + N_1 + N_2 + N_3, \quad (2)$$

式中 $R(\lambda)$ 为相机的光谱响应函数, G 为增益放大系数, N_1 为 CCD 光电转换过程中的暗电流噪声, N_2 为与入射辐照度无关的噪声,包括读出噪声、量化噪声等, N_3 为与入射辐照度有关的噪声,包括光子散粒噪声等。暗电流噪声是与温度相关的噪声,且随增益及曝光时间的增加而线性增加^[5-6], 而 N_2 和 N_3 具有平均值为零的特征,所以可以通过多次取样平均来消除它们的影响^[7]。

令

$$R = \frac{\pi A_d \tau_0 t}{4F^2} R(\lambda) G, \quad (3)$$

则 CCD 输出 D_N 值可简化为

$$D_N = R \cdot L(\lambda) + N_1. \quad (4)$$

由于大多数 CCD 输出的灰度值与输入的辐射照度之间并非严格的线性关系,根据文献^[8],二者之间的关系可用泰勒级数公式描述:

$$D_N = D_{N_0} + R_1 \cdot L(\lambda) + R_2 \cdot L(\lambda)^2 + R_3 \cdot L(\lambda)^3 + \dots + R_n \cdot L(\lambda)^n, \quad (5)$$

式中 D_{N_0} 是 CCD 在零辐照度下的信号输出,为暗信号输出, R_1 为 CCD 的线性响应系数,为绝对辐射响应度, R_2, R_3, \dots, R_n 为二次以上的高次响应系数。

3 辐射标定实验的原理分析与方案设计

3.1 辐射标定方法

在实验室条件下,传统的辐射标定方法是采用经过标定的目标物,典型的标定目标物是灰阶卡,来进行辐射标定。响应的算法称作基于图标的标定算法,它测量不同梯度条的灰度值并将测量结果与这些梯度条已知的反射系数进行比较,将会产生一系列的独立测量结果,通过对结果的函数拟合,完成辐射标定。该方法存在的主要问题是:需要非常均匀的照明,晕影效应会导致灰度值不能正确提取,标定板格式没有标准化,相机响应函数值域受到通过数据拟合得到的单一函数的限制等。这些问题使得该方法的可操作性较差。

不使用标定板的辐射标定算法称为无图标辐射标定算法。它是通过在不同辐射照度下对同一场景所拍摄的一系列图像来实现。根据标定所用的光源差异,无图标辐射标定算法包括:平行光管标定,朗伯板标定和积分球标定。平行光管只能照亮较小的范围,朗伯板的边缘部分杂散光较大,积分球视场较大、照度均匀,但是体积较大、易受温度影响。

当前辐射标定论文中多为对整个成像系统,包括光学系统和探测器,进行辐射标定,使用的定标光源多为积分球。由于光学系统的会聚作用使得在像面处的能量分布不再均匀,从而使得像面不同像素产生不同的数字输出,这与光源为统一均匀辐射的事实相矛盾。因此,实验采用辐射光源直接照射探测器探测面,在满足无图标辐射标定要求的前提下避免了光学系统的影响。对于光学系统对成像结果产生的影响,采用相机内外参数校准的方法加以标定和校准。由于本课题成像测量的目标区域在整幅图像中心位置,面积比为 1/25,因此实验的辐射光源采用标准光源与朗伯板配合的形式。

3.2 标定实验原理

采用 500 万像素黑白 CCD 探测器。由(6)式可知, $D_{N_0}, R_1, R_2, R_3, \dots, R_N$ 为辐射校正系数,确定这

些校正系数就可以还原出真实的目标景物辐射照度图像。

选取 n 组不同的入射辐射照度,组成多个测量方程:

$$\begin{bmatrix} R_{DN1} \\ R_{DN2} \\ R_{DN3} \\ \vdots \\ R_{DNn} \end{bmatrix} = D_{N0} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & L_1^2 & L_1^3 & \dots & L_1^N \\ L_2 & L_2^2 & L_2^3 & \dots & L_2^N \\ L_3 & L_3^2 & L_3^3 & \dots & L_3^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ L_n & L_n^2 & L_n^3 & \dots & L_n^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中已知图像输出灰度值 R_{DN} , 入射辐射照度 L 和暗电流噪声 D_{N0} , 当满足条件 $n > N$ 时, 即可解得辐射校正系数 $R_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

3.3 实验方案

实验室内采用标准均匀光源照射朗伯板作为相机标定光源进行 CCD 在确定的工作模式下的辐射标定实验。所需的设备包括: 标准光源、朗伯板、光谱辐照度计、CCD 图像采集设备和用于处理数据的计算机, 如图 1 所示。标定实验包括相机暗电流噪声响应测试和辐射响应测试两个部分。

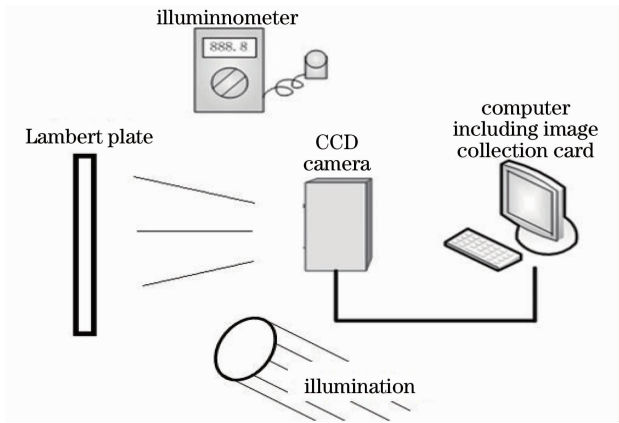


图 1 实验室辐射标定原理图

Fig. 1 Principle of radiometric calibration in laboratory

根据课题需求分析, 选定的相机为韩国 IMx 公司生产的 7050G 千兆网 500 万像素黑白 CCD 相机。根据系统应用环境分析, 相机确定的工作模式为: 物距 100 mm, 背景照度 90 lx 左右, 目标照度 100~400 lx, 结合选定的日本 Kowa 公司 25 mm 定焦镜头确定相机的曝光时间为 10 ms, 增益为 0。

相机暗电流噪声测试, 在恒温实验室中进行。相机暗电流受到环境温度的影响。由于系统的使用环境为恒温室, 环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 单次使用时间不超过 15 min, 因此可认为温度相对恒定, 暗电流受温度影响而波动的情况可以忽略。因而本实验并未对温度变换引起的暗电流变化进行测试。在实验室

中, 盖上相机镜头盖, 系统以黑绒布遮盖, 选取已定的工作模式, 测得相机最终输出的图像灰度值。

相机辐射响应测试, 要求将实验设备固定在光学平台上。固定朗伯板, 保证相机的光轴垂直与朗伯板平面, 相机光轴与朗伯板的交点大致处于朗伯板的中心位置。光谱辐照度计置于靠近 CCD 探测面位置, 并且保证其探测面与 CCD 探测面平行。光源置于朗伯板前的滑轨上, 其相对于朗伯板距离可调。实验系统以黑绒布遮光, 通过计算机设定相机的已定工作模式, 并控制图片采集, 通过光谱辐照度计测得图片采集时的辐射照度。

以上每个状态的图片采集张数为 21 张, 为了消除 (2) 式中 N_2 、 N_3 等噪声, 采用 20 张图片做相加平均处理。参与计算的 20 张图片由 21 张采集图片中随机选取。

4 实验结果及分析

4.1 暗电流测量结果

根据系统要求, 选取相机已定的工作模式。图像输出灰度格式为 8 bit, 即像素灰度数字输出为 0~255。选取 BMP 格式灰度图像作为计算图像。

通过计算得到, 暗信号均值为

$$\bar{D}_{N-Dark} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_{N0_{i,j}}}{m \times n} = 0.061, \quad (7)$$

式中 m 、 n 分别为图像在两个方向上的像素数。

暗信号噪声为

$$D_{N-Dark, noise} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^k (D_{N0_{i,j,m}} - \bar{D}_{N_{i,j,Dark}})^2}{k-1}} = 0.005, \quad (8)$$

式中 k 为选择的参与计算的图片数量, $D_{N0_{i,j,m}}$ 为 CCD 第 i 行第 j 列像素第 m 幅图像的暗信号,

$$\bar{D}_{N_{i,j,Dark}} = \frac{\sum_{m=1}^k D_{N0_{i,j,m}}}{k} \text{ 为第 } i \text{ 行第 } j \text{ 列像素 } k \text{ 幅图像}$$

的平均暗信号。

4.2 相机辐射响应特性及拟合结果

获取的图像为 BMP 格式,像素数为 2448 pixel×2048 pixel。由于系统实际应用时只采用图像中间部分,为了图像处理速度,通过计算选取图像中间 388 pixel×348 pixel 的图像作为标定的目标范围。

包括实验室背景光在内,按照光源光强的不同,共进行了 7 组实验,得到 7×21 张图片,随机选取每组 20 张图片后,计算图片灰度平均值,如表 1 所示。

表 1 CCD 表面辐射照度与灰度值之间的关系

Table 1 Numerical relationship between irradiance on the surface of CCD and gray value

Experimental group	Irradiance /lx	Gray value
Background	14.96644844	7.3847
First	20.38915005	60.5367
Second	24.92790802	98.3953
Third	31.67794813	141.6744
Forth	37.50478165	172.2561
Fifth	45.27672033	206.4182
Sixth	52.27858135	234.1613

如图 2 所示,为相机 CCD 探测面处辐射照度与数字输出之间的关系图,可知该 CCD 相机的灰度响应曲线与理想线性响应曲线存在较大的偏差。通过对多个工业相机测试得到的响应曲线与该曲线较为相似,即与理想线性响应曲线的偏差较大,由此可知工业相机应用于图像测量领域时进行辐射标定必不可少。

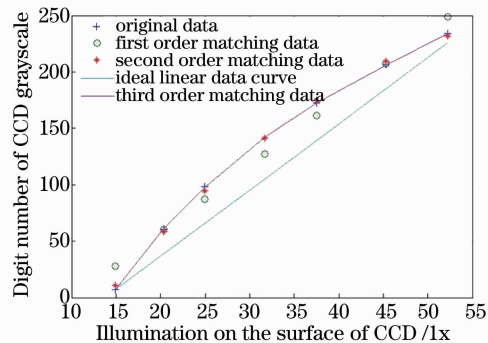


图 2 原始数据曲线与标准曲线对比

Fig. 2 Contrast of real data curve and ideal linear data curve

首先通过数据拟合求的 CCD 相机的真实响应曲线,才能进一步解得其与理想响应的补偿函数。通过对本系统实际使用环境的测试和成像系统的辐射响应特性分析,采用的拟合照度的目标区间为 15~57 lx。低于 15 lx 时,灰度响应受到 CCD 成像

系统本身的各种噪声影响较大,并且实际使用时辐射照度不会低于 15 lx。高于 57 lx 时,探测器响应趋近饱和,通过光源与相机工作模式的配合,不会使 CCD 像面处的辐射照度高于 57 lx。因此 CCD 探测面处辐射照度 L 的取值范围为 15~57 lx。拟合结果如表 2 所示。

表 2 真实响应曲线拟合结果

Table 2 Fitting of real response data curve

Fitting power	Fitting equation	Assessment
First	$D_N = 5.927L - 60.673$	1108
Second	$D_N = -0.0923L^2 + 12.131L - 150.4$	51.16
Third	$D_N = 0.002L^3 - 0.2968L^2 + 18.45L - 209.1$	0.6752
Forth	$D_N = -7.862 \times 10^{-6}L^4 + 0.0031L^3 - 0.3464L^2 + 19.4224L - 215.7334$	0.6098

表 2 的评估结果是用拟合之后的灰度值减去测量灰度值,再平方相加的结果。从表中可知,三阶拟合结果和四阶拟合结果相差较小,综合考虑,选择三阶拟合结果作为 CCD 对辐射照度的真实灰度响应曲线,如图 3 所示。

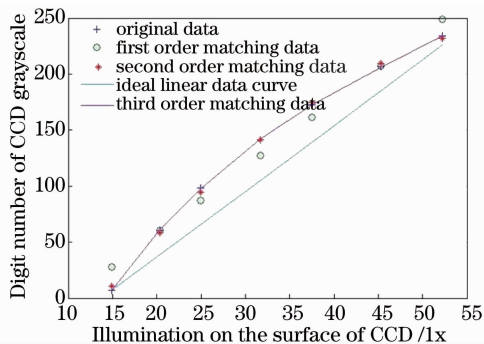


图 3 真实响应曲线拟合结果对比

Fig. 3 Contrast of real data fitting result

4.3 补偿函数的确定

由 4.2 节结论部分已经得到了 CCD 真实辐射照度与数字灰度值的响应曲线,如果确定了 CCD 的理想线性响应曲线,那么根据两曲线之间的关系即可拟合补偿曲线。对所采集的图片通过补偿函数的变换即可得到线性响应的结果,即完成 CCD 相机的辐射标定和校准。

对于一个确定的 CCD 探测器而言,其理想线性响应曲线本身是不存在的,是人为根据实际条件和应用需要规定的,但是肯定为一阶线性响应曲线,即斜率 a 大于零即可。至于斜率 a 和截距 b 的具体值,不影响图像处理的精度,因此可以根据具体的系统应用环境确定。

系统正常使用的工作环境辐射照度为 101.3~396.8 lx, 即背景最暗 101.3 lx, 目标最亮为 396.8 lx, 由(2)式计算的在 CCD 探测面处的辐射照度为 15.42~57.20 lx。通过相机工作模式的配合, 使得 CCD 像面辐射照度为 57.20 左右时 CCD 灰度数字输出达到最大 255, 经实际测试在 57.1897 lx 时 CCD 灰度数字输出刚好达到 255。在辐射照度为 15 lx 时 CCD 灰度数字输出为 7.40, 因此理想线性响应曲线为这两点之间的连线。

通过理想响应曲线与实际响应曲线的关系, 拟合补偿函数, 拟合结果如表 3 所示。

表 3 补偿函数曲线拟合结果

Table 3 Fitting of compensation function curve

Fitting power	Fitting equation	Assessment
First	$D_{N_x} = 1.033D_N - 27.65$	5793
Second	$D_{N_x} = 0.0025D_N^2 + 0.3389D_N + 7.473$	60.32
Third	$D_{N_x} = 1.502 \times 10^{-6} D_N^3 + 0.0019D_N^2 + 0.4070D_N + 5.7551$	51.86

表 3 中 D_{N_x} 为理想灰度值输出。由评估结果可知, 三阶拟合结果与二阶拟合结果相差较小, 且相对于拟合组数据二者的评价结果都较为理想。综合考虑, 选择二阶拟合结果作为 CCD 探测器真实输出值的补偿函数, 如图 4 所示。

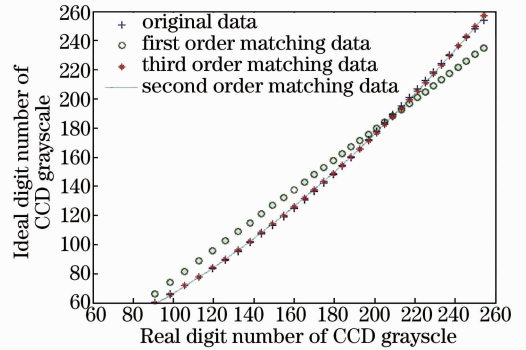


图 4 补偿函数拟合结果对比

Fig. 4 Contrast of compensation function fitting result

至此, 完成补偿函数的确定。CCD 探测器实际输出结果, 通过补偿函数的作用, 得到理想线性响应曲线, 即为在图 2、3 中用于对比的理想曲线, 对比原始图像与补偿之后的图像, 如图 5 所示。

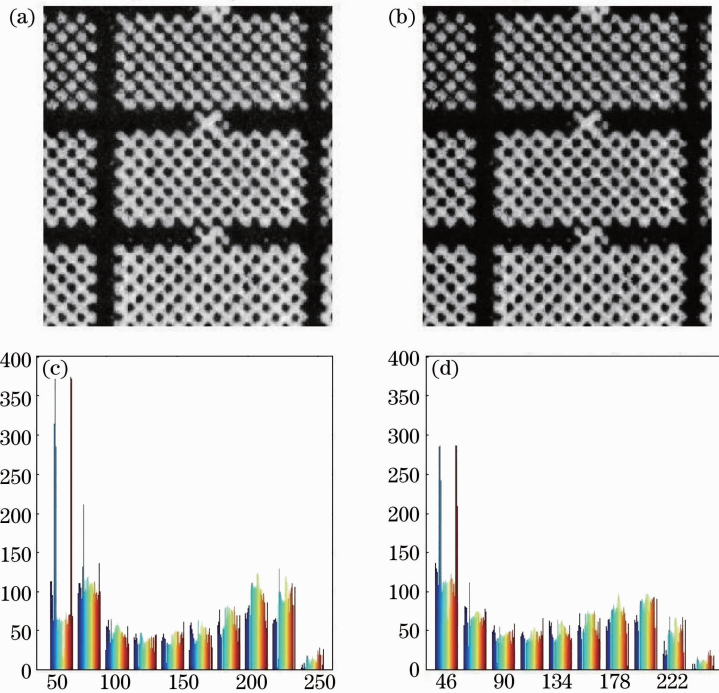


图 5 实际图像与经过补偿之后的图像对比。(a) 原始图像；(b) 补偿后图像；(c) 原始图像灰度直方图；(d) 补偿后图像灰度直方图

Fig. 5 Contrast the original image of the image after compensation. (a) Image before compensation; (b) image after compensation; (c) the grayscale histogram of the image before compensation; (d) the grayscale histogram of the image after compensation

对比两图以及其直方图。灰度值低于 70 区域, 补偿之后的像素数有所增加, 原因是灰度补偿相当于某种灰度值归一化运算, 原图像经过补偿之后其

灰度值覆盖的范围会有所增加。该范围灰度值进一步变小、灰度值变化进一步平滑, 从而使得灰度值在该区域内有少量增加。在灰度值 70~230 区域内,

是图像信息的关键区域,也是算法的目标区域。变换后图像的灰度值分布与原图相比更加平均,并按照更加平缓的规律变化,这更加符合图片的实际辐射照度分布规律。在灰度值 230~255 区域内,补偿之后的像素数略微减少,是因为在图像处理中最大灰度值区域一般不作为算法关心的重点,因此在图像补偿时,尽可能区分出最大灰度值与相对大灰度值,以便图像处理算法对最大值舍去。

4.4 不确定度分析

通过上述实验完成了 CCD 辐射标定和校准,对实验系统不确定度分析得出:

1) 光谱辐照度标准光源由中航工业计量所提供,标准灯工作电流 4.5 A,下额定功率 450 W,辐照度不确定度为 4.1%。标准朗伯白板由中航工业计量所提供,尺寸为 300 mm×300 mm,标称的反射率不确定度为 3.0%。光源与标准朗伯板的真实距离与测定距离存在误差,根据平方反比定律,导致的辐照度不确定度小于等于 1%。综合考虑辐射度不确定度为 $u_1=5.178\%$ 。

2) 经查,光谱辐照度计的输出信号不确定度为 $u_2=1.3\%$ 。

3) 图像采集和变换系统误差和噪声误差以及 AD 转换不确定度^[7]为 $u_3=3\%$ 。

4) 采用拟合算法对定标数据的处理也会产生一定的不确定度^[2]为 $u_4=1\%$ 。

由这些因素共同决定 CCD 相机辐射标定的不确定度为

$$U = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 6.205, (k = 2). \quad (9)$$

满足辐射标定不确定度小于等于 10% 的指标。

5 结 论

在分析了辐射标定在成像测量领域应用的必要

性之后,阐述了辐射标定的原理,设计了标定 CCD 相机的实验过程。通过对所得实验数据的分析,解出了 CCD 的真实响应函数,并通过数据拟合得到了 CCD 真实响应与理想线性响应之间的补偿关系函数,最终建立了 CCD 探测面处辐射照度与 CCD 灰度数字输出值之间的函数关系。在规定的 uncertainty 范围内,完成了 CCD 辐射标定和校准。

参 考 文 献

- 1 C Steger, M Ulrich, C Miedemann. Machine Vision Algorithms and Applications[M]. Yang Shaorong, Wu Dijing, Duan Deshan Transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. 101-111. 斯蒂格,尤里奇,威德曼. 机器视觉算法与应用[M]. 杨少荣,吴迪靖,段德山译. 北京:清华大学出版社,2008. 101-111.
- 2 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): 1365-1374. 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): 1365-1374.
- 3 Liu Yaxia. Research on the laboratory radiometric calibration of the TDI CCD camera[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(5): 72-74. 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): 72-74.
- 4 Ren Jianwei, Wan Zhi, Li Xiansheng, *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for optical remote sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1186-1190. 任建伟,万志,李宪圣,等. 空间光学遥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.
- 5 Windenhorn R, Dunlap J C, Bodrgom E. Exposure time dependence of darkcurrent in CCD imagers [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(3): 581-587.
- 6 Widenhorn R, Hartwic I, Dunlap J C, *et al.*. Influence of illumination on dark current in charge coupled device imagers[J]. Journal of Electronic Imaging, 2009, 18(3): 033015.
- 7 Gu Y, Erson J M, Mon K J G C. An approach to the spectral and radiometric calibration of the VIFIS system[J]. Int J Remote Sensing, 1999, 20(3): 535-548.
- 8 Chen Feng, Zheng Xiaobing. Influence of spectrum notmatching on calibration precision of remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(3): 514-519. 陈风,郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 514-519.

栏目编辑:何卓铭