

# 基于场景坏点检测的面阵 CCD 暗电流估计方法

程 宣 赵慧洁

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 教育部精密光机电一体化技术实验室, 北京 100191)

**摘要** 利用 CCD 中的部分坏点作为温度敏感器, 提取 CCD 温度估计值, 建立温度估计值与暗电流的函数模型, 并结合均值滤波的方法, 在真实场景图像中提取 CCD 温度估计值, 实现了面阵 CCD 的暗电流估计。在方法分析的基础上, 以真实的暗电流数据为基准参考, 对暗电流的估计结果进行了比对实验。实验结果表明, 在不同的积分时间及大动态范围的成像条件下暗电流的估计结果十分准确, 偏差小于 0.4%, 并且具有一定的抗噪性。该方法利用场景本身的特征信息对拍摄时刻的暗电流进行估计, 不需要额外采集暗电流数据, 节省了图像采集时间, 十分适合于积分时间较长的高光谱成像或天文观测领域, 采用无温度控制的低成本 CCD 成像探测系统进行实时图像采集。

**关键词** 成像系统; 暗电流估计; CCD; 坏点; 均值滤波; 抗噪性; 图像采集

中图分类号 TP212.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0404002

## Dark-Current Calculation Method of Area CCD Based on Bad Pixels Detection in the Scene

Cheng Xuan Zhao Huijie

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Education Ministry, School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** Bad pixels in the area CCD detector are used as temperature sensor, to estimate the CCD temperature, and to establish the function model between the CCD temperature and the dark current. In order to make the result insensitive to noise; mean filtering method is used to estimate the CCD temperature in the image of the real scene. After extraction of the CCD temperature of the real scene, the dark current of area can be estimated. Based on analysis of the method, using the real dark current as standard, the result of the dark current estimation has been validated. The experiment shows that the estimation of the dark current is very exact in both different integration time and large dynamic range conditions with the rate of error under 0.4%. Furthermore, it is not sensitive to the noise within the images. The method uses the character of the image to estimate dark current, so it is not necessary to collect the dark-current data, and the image acquisition time can be saved. Therefore, this method is very suitable to the low-cost CCD imaging system without temperature control for real-time image acquisition in hyper-spectral imaging or astronomical observation fields.

**Key words** imaging systems; dark-current estimation; CCD; bad pixels; mean filtering; anti-noise capability; image acquisition

**OCIS codes** 040.1520; 110.2960; 110.4280

## 1 引 言

暗电流是 CCD 图像传感器的特性之一, 也是非制冷 CCD 的一个主要噪声源。对于定量化成像数据分析, 如光谱成像数据, 暗电流的影响必须剔除。

暗电流的去除精度直接影响数据的辐射准确性<sup>[1]</sup>。为了减少暗电流的产生, 一些科学成像系统选用制冷型 CCD 相机, 部分相机同时具有温度控制功能, 在成像周期将 CCD 芯片温度控制在某一固定温度,

收稿日期: 2011-08-04; 收到修改稿日期: 2011-11-07

基金项目: 国家 863 计划(2008AA12A201)资助课题。

作者简介: 程 宣(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光谱成像探测技术方面的研究。

E-mail: chengxuan2002@163.com

导师简介: 赵慧洁(1966—), 女, 博士, 教授, 主要从事光谱成像探测、高光谱数据处理、机器视觉理论及应用等方面的研究。E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

在长时间工作状态下减少外界环境的变化对 CCD 暗电流引入的波动。

目前,标准的暗电流校正方法是:在正常拍摄状态的前后时刻,通过关闭快门对 CCD 在同样的积分时间条件下进行暗电流采集,该暗电流图像将在真实图像中按像元相减剔除。在暗电流采集过程中,为了减少散粒噪声的影响,通常通过拍摄多幅图像求取加权平均,获得真实的暗电流数据<sup>[1,2]</sup>。针对具备恒温控制的 CCD 相机而言,可以通过实验室标定的方法获得相同温度的暗电流数据,而对于不具备恒温控制的 CCD 相机,由于不知道 CCD 芯片工作温度,需要现场实时采集暗电流数据,会大大增加现场的图像采集时间,在实时图像采集中很难完成。

国内外学者在暗电流校正方面的研究并不多,主要在 CCD 传感器的噪声评估中涉及。国外学者在暗电流特性分析和仿真方面进行了相关的研究。美国波特兰州立大学的 Widenhorn 等<sup>[2]</sup>发现 CCD 暗电流在某个温度范围内满足 Meyer-Nelder 规律(MNR),可以利用 MNR 方法对暗电流进行建模,通过实验分析,取得了较好的吻合效果;Widenhorn 等<sup>[3]</sup>对于闭快门时的暗电流是否等于场景曝光时的暗电流信息产生质疑,研究表明,少量特定的像元在关闭快门时的暗电流与场景曝光时相比,具有固定的系统差异,该现象仅仅通过实验现象获取,并未给出理论原因;美国 Agilent 实验室的 Baer<sup>[4]</sup>针对不同条件下的暗电流采用不同的标准概率分布模型进行拟合和仿真,试图找到不同条件下最佳的暗电流分布模型。目前,工程上仍然较多地采用标准的暗电流校正方法<sup>[5~7]</sup>,或者采用温度控制或者温度检测的方法在实验室对暗电流进行标定。

本文在上述暗电流特性研究的基础上,利用面阵 CCD 中的坏点,结合均值滤波处理,提出了基于场景的暗电流估计方法,不需要额外的暗电流数据采集,在保证准确性的同时,大大地节省了数据采集时间,为实时图像采集与暗电流采集的矛盾提供了一种较好的解决办法,十分适合于无温度控制的低成本 CCD 成像探测系统在积分时间较长的高光谱成像或天文观测领域中的应用。

## 2 基于场景坏点检测的暗电流估计方法

### 2.1 方法原理

暗电流信号本身在输出图像上产生固定图像噪声(FPN),由于暗电流受温度影响较大,且不同像元的影响特性存在差异,在没有与温度有关的先验信

息的情况下直接提取暗电流很困难。

CCD 中的“坏点”是指与输入无关的响应为零或者达到饱和临界值的死点以及响应度明显高于/低于平均响应的点。其中,响应明显高于平均响应的点称为亮点,明显低于平均响应的点称为暗点。亮点是 CCD 坏点的一种表现形式,也是 CCD 的重要特征之一。亮点的成因分为两种:一种是由光电二极管的暗电流不均匀造成,另一种是由光电二极管的感光度不均匀造成。前者又称为“热点”,该类亮点对温度更为敏感,暗电流对温度的响应明显高于其他相邻像元,并随着曝光时间的增加而线性增大<sup>[8]</sup>,亮点的分布大致成离散分布。因此,可以利用该类亮点的暗电流响应和分布特征提取等效温度信息,然后利用等效温度信息的标定数据进行暗电流估计。

该算法的基本思想是:在 CCD 相机参数固定的条件下,将 CCD 中的亮点作为温度敏感器,将加权处理后的亮点值  $p_h(x, y)$  作为工作温度  $T$  的估计值,采用参数标定和建模计算相结合的方式估计暗电流。

### 2.2 方法设计流程

根据该方法的基本原理,具体的执行流程分为两部分,部分 1 通过获取 CCD 特定温度下的暗电流数据,完成逐像元暗电流估计参数的计算;部分 2 完成实际场景的亮点提取和相应的暗电流估计。具体执行分为以下 7 步,步骤 1~5 属于部分 1,步骤 6,7 属于部分 2。

1) 首先建立 CCD 中各亮点对工作温度  $T$  的估计值  $p_h(x, y)$  的计算模型,利用暗电流图像得到不同温度  $T$  下对应的  $p_h(x, y)$  的值。计算模型为

$$p_h(x, y) = \sum_{i=-1, j=-1}^{i=1, j=1} f_w(i, j) p(x+i, x+j), \quad (1)$$

式中  $(x, y)$  为像素坐标,  $p_h(x, y)$  为检测出的工作温度  $T$  的估计值,  $f_w(i, j)$  为加权因子,  $p(x+i, x+j)$  为实际像素灰度值。

实际场景图像中的  $p_h(x, y)$  计算方法跟暗电流图像一致,为了剔除亮点中目标辐射信息,(1)式采用了邻域加权求和的方法。在实际场景图像中,亮点与周围一定邻域内的真实信号存在相关性,邻域过大会降低相关性,邻域过小会降低真实亮度的提取精度,实际应用中采用了  $3 \times 3$  的掩模,如图 1 所示。通过设定阈值,选择步骤 1 中温度估计值  $p_h(x, y)$  较大的  $N$  个像元作为工作温度  $T$  的估计样本,为了减小图像中噪声的影响,特别是单一的场景图像,估计

样本数量不能过少,由于 CCD 噪声中泊松或高斯分布占主导,样本点最好选择 100 个以上。

$f_w(-1,1)$	$f_w(0,1)$	$f_w(1,1)$	-0.15	-0.10	-0.15
$f_w(-1,0)$	$f_w(0,0)$	$f_w(1,0)$	-0.10	1.00	-0.10
$f_w(-1,-1)$	$f_w(0,-1)$	$f_w(1,-1)$	-0.15	-0.10	-0.15
(a)			(b)		

图 1 用于亮点值计算的掩模。(a)  $3 \times 3$  掩模;  
(b) 掩模系数

Fig.1 Masking for hot pixels calculation. (a)  $3 \times 3$  masking; (b) masking factor

2) 对选择出的各样本点温度估计值  $p_h(x, y)$  求取平均值  $\overline{p_h(x, y)}$ , 作为对工作温度  $T$  的等效值  $T_{est}$ , 计算方法可表示为

$$T_{est} = \overline{p_h(x, y)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{h_i}(x, y). \quad (2)$$

3) 对不同温度下的各样本点对应的数据  $[p_h(x, y), T_{est}]$  做最小二乘拟合, 得到不同坐标  $(x, y)$  下各亮点与温度估计值  $T_{est}$  对应关系的拟合参数。(3) 式为实际场景图像温度估计的计算模型。结合普通科学级 CCD 相机的通常工作温度, 一般在 (263 K, 293 K) 之间, 由于选取的温度范围不大, 采用最小二乘的线性回归便能达到很好的效果, 得到拟合参数  $a(x, y)$  和  $b(x, y)$ 。

$$p_h(x, y) = a(x, y)T_{est} + b(x, y). \quad (3)$$

4) 建立每个像元暗电流灰度值  $P(x, y)$  和工作温度估计值  $T_{est}$  的函数模型, 利用最小二乘非线性回归将拟合得到的三个参数  $m, n$  和  $q$  作为暗电流估计的计算系数。拟合函数为

$$P(x, y) = mT_{est}^2 + nT_{est} + q. \quad (4)$$

5) 针对实际场景图像, 为准确的提取亮点值, 消除图像噪声的影响, 对场景图像进行均值滤波处

理, 并将处理后亮点位置的像元用处理前图像同位置的亮点替换。均值滤波器采用  $3 \times 3$  的平滑线性滤波器, 计算公式为

$$p(x, y) = \frac{1}{16} \sum_{i=1, j=1}^{i=1, j=1} w(i, j)p(x+i, x+j), \quad (5)$$

式中  $w(i, j)$  采用加权平均, 如图 2 所示。

	1	2	1
$\frac{1}{16} \times$	2	4	2
	1	2	1

图 2 均值滤波器掩模

Fig.2 Masking for mean filter

6) 利用步骤 1) 和 2) 中选取的  $N$  个亮点样本, 根据(1)式得到对应各亮点的一组  $p'_h(x, y)$ 。

7) 代入步骤 3) 中得到各温度样本点的拟合参数  $a$  和  $b$ , 计算出各点的实际温度估计值  $T_{est}$ , 并对计算出的一组  $T'_{est}$  进行加权平均处理, 作为该场景图像最终的温度估计  $\overline{T'_{est}}$ 。

8) 将计算出的温度估计值  $\overline{T'_{est}}$  代入(4)式计算出各个像元实际的暗电流  $P'(x, y)$ , 完成对该场景真实暗电流的估计。

### 3 实验分析与验证

实验选用一款美国 Sarnoff 公司的帧转移 CCD 相机(型号: CAM1M100-SFT), 该相机具有一级半导体制冷器, 焦面最低温度可达  $0^\circ\text{C}$ , 控温精度为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

实验分别选取 500 ms 长积分时间和 50 ms 短积分时间两种模式进行分析, 验证不同积分时间下亮点对温度估计精度的影响。在 275~300 K 温度范围内, 选取了 9 个温度点进行处理, 如表 1 所示。

表 1 275~300 K 温度范围内的温度样本点选取表

Table 1 Temperature sample points selected in the range 275~300 K

Integration time /ms	Temperatures of samples /K								
500	275.76	278.69	280.84	283.78	285.12	286.53	288.00	293.00	295.55
50	275.35	278.88	280.65	283.59	285.00	291.04	293.00	295.94	298.20

#### 3.1 获取温度样本点暗电流数据

首先分别对 500 ms 和 50 ms 积分时间下的 9 个温度样本点暗电流数据分别进行采集, 采用标准的暗电流获取方法, 多次获取求取平均值, 作为标准暗电流数据。

#### 3.2 选取 CCD 亮点

如前文所述, 当焦面温度较高积分时间较长时, 亮点的特性较为明显, 选取 500 ms 积分时间,  $20^\circ\text{C}$  温度下的暗电流数据用于获取亮点样本点。采用方法原理中步骤 1) 和 2), 并记录选取的亮点坐标。总

共选取了 214 个亮点样本。

### 3.3 计算 9 个温度点的温度估计值 $T_{est}$ 和 $p_h(x, y)$ 之间的关系

根据方法原理中的步骤 3) 和 4) 分别计算出 9 个温度点的温度估计值  $T_{est}$ 。在 214 个亮点样本中将 22 个拟合效果较差的数据点, 作为异常点剔除, 剩余 192 个亮点样本, 占总像元的 0.0366%。图 3 为其中一个样本点随温度升高的暗电流响应与平均暗电流响应的比较图, 从图中可以看出, 与 CCD 的平均暗电流相比, 亮点样本对温度更为敏感。图 4 为任意选取两个亮点的灰度值与温度估计值之间的拟合图, 两个亮点的坐标分别为 (20, 318) 和 (25, 816)。从图中可以看出, 数据的拟合效果很好, 说明

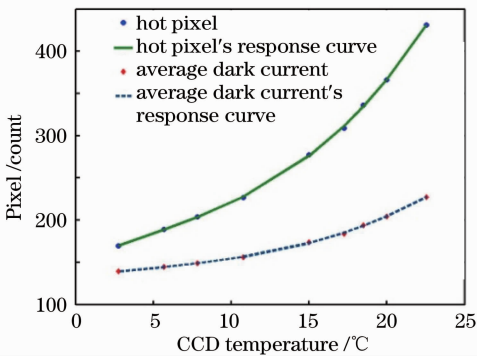


图 3 亮点暗电流与平均暗电流响应的比较图

Fig. 3 Comparison diagram of response of the hot-pixel current and average dark current

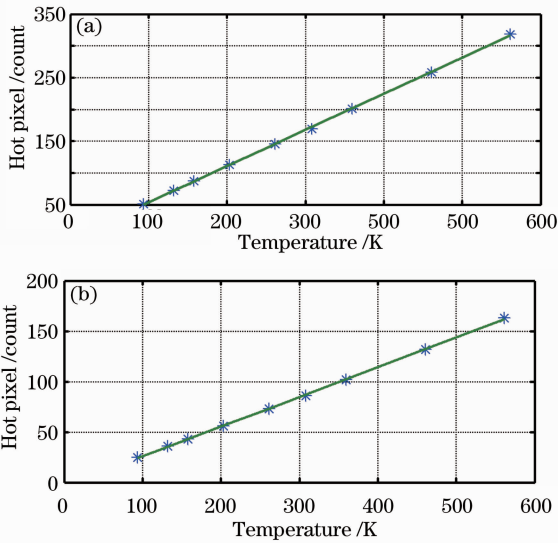


图 4 灰度值与温度估计值的拟合图。(a) 坏点 1; (b) 坏点 2

Fig. 4 Diagram of fit curves about pixel counts and estimated temperature. (a) Bad pixel 1; (b) bad pixel 2

在该温度范围内, 利用最小二乘线性拟合的方法能够很好地估计出亮点的亮度值与温度估计值之间的函数关系, 为从实际场景中准确地进行温度估计提供了保证。

### 3.4 确定每个像元暗电流灰度值和工作温度估计值 $T_{est}$ 之间的函数模型

利用 3.3 节中得到的温度估计值  $T_{est}$  以及 9 个温度点下的暗电流数据, 根据方法原理中的步骤 5) 确定每个像元暗电流灰度值和工作温度估计值之间的函数模型, 用于从实际场景图像获取温度估计值后进行暗电流大小的计算。图 5 为 500 ms 下任意 4 个像元点暗电流灰度值与温度估计值的多项式拟合数据图, 4 个像元的坐标分别为 (100, 100)、(100, 150)、(100, 200) 和 (200, 300)。

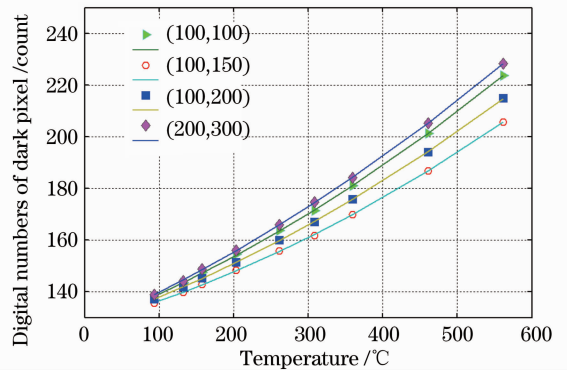


图 5 像元暗电流灰度值与温度估计值的拟合图

Fig. 5 Diagram of fit curves about pixel counts of dark current and estimated temperature

从图中可以看出, 最小二乘二次多项式拟合的方法能够很好地拟合出单个像元暗电流灰度值与温度估计值之间的非线性关系, 利用二次多项式拟合的 3 个拟合参数  $m$ 、 $n$  和  $q$ , 能够准确地计算出实际场景各像元的暗电流。

### 3.5 实验结果

得到温度估计和暗电流计算拟合参数后, 利用实际场景对该算法进行验证。将已知温度(选取的 9 个温度样本点)的实测暗电流数据获取的温度估计值与图像中提取的温度值进行对比, 验证该方法在场景中提取温度估计值的准确度; 再将估计出的暗电流数据与实测的暗电流数据利用直方图进行差异比对, 检验暗电流估计的准确度。图 6 为 500 ms 和 50 ms 下的实际场景图, 图 7、9 分别是积分时间为 500 ms 和 50 ms 下的暗电流数据和场景数据温度估计值的对比图。从图中可见, 场景和真实暗电流之间的温度估计基本一致。由于真实暗电流数据

采用多幅求取平均的方法去除了随机噪声,而场景图像含有散粒噪声、读出噪声和暗电流噪声等噪声<sup>[9,10]</sup>,因此,数据在真实数据中心存在一定程度的波动。对各亮点样本求取均值后能与实测暗电流数据很好地吻合。

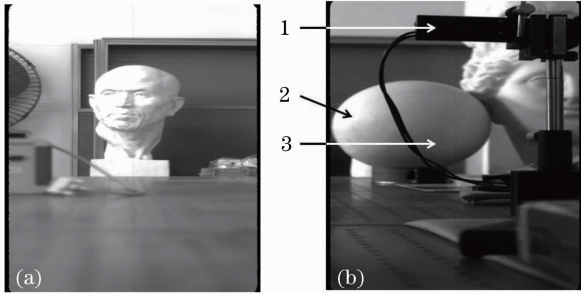


图 6 实验场景图。(a) 50 ms; (b) 500 ms

Fig. 6 Scenes used in the experiment. (a) Scene in 50 ms; (b) scene in 500 ms

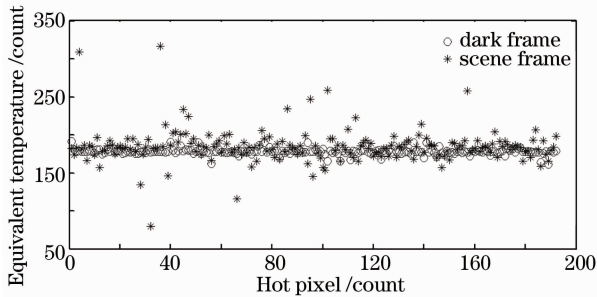


图 7 500 ms 下亮点样本的温度估计值的对比图

Fig. 7 Contrast of estimated temperature of hot-pixel samples in 500 ms

图 8、10 分别为 500 ms 和 50 ms 积分时间下不同温度的实测暗电流与 282.1 K 温度下估计出的暗电流图像的差异比较。由于采用图像对比的方式或者采用像素值统计的方法衡量很不直观,这里采用直方图的形式,横坐标为真实暗电流与估计暗电流的灰度值之

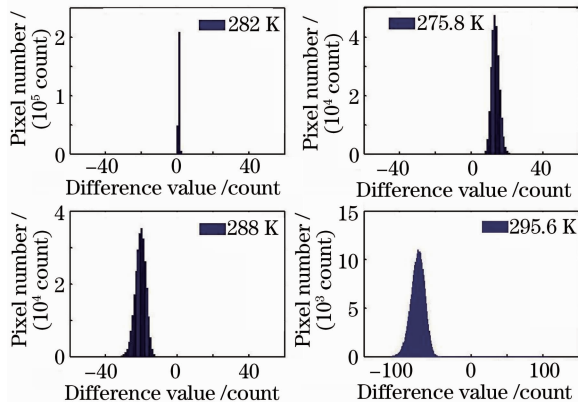


图 8 500 ms 下差异比较直方图

Fig. 8 Histograms of differences in 500 ms

差,纵坐标为像元数。从图中可以看出,暗电流的估计值与 282.1 K 相同温度下的真实暗电流差异最小,几乎所有的像元间差异均在零值附近,说明估计出的暗电流数据与实测数据吻合较好;其他温度下符合随温度升高,暗电流差异逐渐增大的规律。50 ms 下的实验数据结果如图 10 所示,可以看出,在积分时间较短的情况下,暗电流的估计结果也较为准确。

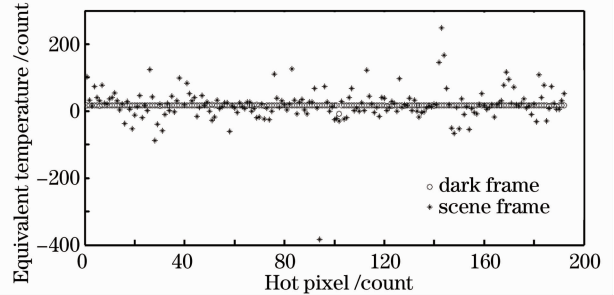


图 9 50 ms 下亮点样本的温度估计值的对比图

Fig. 9 Contrast of estimated temperature of hot-pixel samples in 50 ms

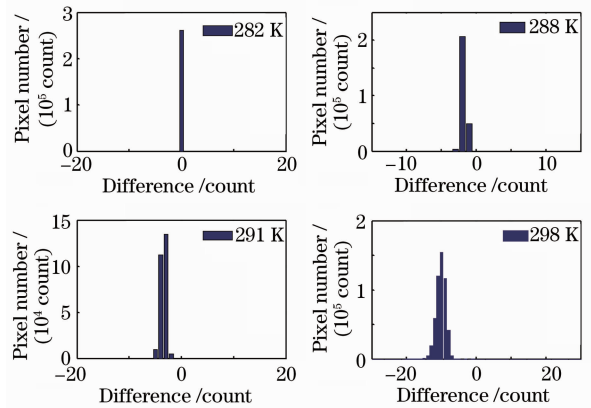


图 10 50 ms 下差异比较直方图

Fig. 10 Histograms of differences in 50 ms

由于 CCD 相机的动态范围较宽,为了验证该方法在不同成像条件及大动态范围下的适用性,在 500 ms 积分时间的场景图像中选择了不同灰度等级的像元作为测试点,表征了不同强度的目标辐射信息,测试点 1、2 和 3 的选择如图 6(b)所示,测试结果如表 2 所示。从估计精度可以看出,随着灰度等级的增加,光子噪声增大,亮点温度估计值的计算

表 2 不同灰度级下暗电流估计精度

Table 2 Estimated precisions in different levels of pixel count

Test point	Count	Measurement	Estimation	Precision /%
1	293	183.90	184.10	0.108
2	1831	190.06	190.41	0.184
3	3565	183.20	182.52	0.371

精度有所降低,但在大动态范围的成像条件下暗电流估计精度变化不大,基本稳定在 0.4% 以内,在不同的成像条件下适用性很好。

考虑到不同拍摄环境下,场景图像的信噪比存在差异,较大的图像噪声会对场景图像等效温度的提取精度产生影响。文中方法采用了均值滤波和多亮点样本求取均值的方法对噪声影响进行了抑制。为验证方法的抗噪性,对 50 ms 下的实验场景图 [图 6(a)] 加了模拟白噪声,噪声参数为  $\sigma=0.04$ ,如图 11(a)、(b) 所示,图 11(c) 为增加噪声前后的暗电流差异比较直方图。通过将图 10(c) 与图 9 进行对比可以看出,增加噪声后,暗电流的估计精度并未受到明显影响,具有一定的抗噪性。通过对不同灰度等级像元以及含有一定非相关噪声分量的图像进行测试,估计精度并未受到影响,结果表明,该方法具有一定的适用性和推广性。

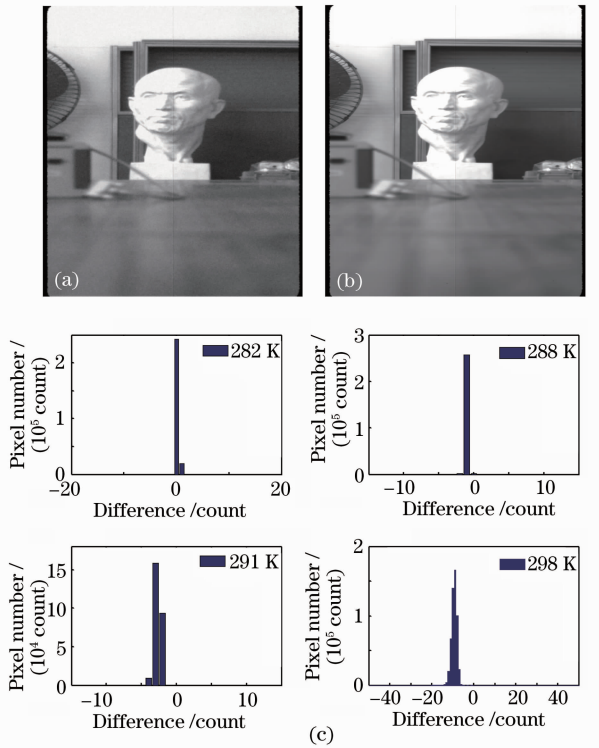


图 11 抗噪性能测试。(a) 加噪前场景;(b) 加噪后场景;(c) 加噪后差异比较直方图

Fig. 11 Test performance of anti-noise capability. (a) Scene with no added noise; (b) scene with added noise; (c) histogram of differences with added noise

阵 CCD 暗电流估计方法在一定的温度范围内能够有效的估计出真实的暗电流数据,并且对于不同的积分时间及大动态范围的成像条件同样适用。该方法不需要现场对暗电流进行多次重复采集,大大节约了现场采集时间,适合与作业环境苛刻,积分模式较为灵活的实时图像采集,同时,不需要 CCD 相机具有恒温控制和温度检测装置,并具有一定的抗噪性,十分适合于低成本没有恒温控制的 CCD 成像系统。特别是为采集速度和采集时间要求较高的领域,如高光谱成像、在线测量等提供了一种暗电流校正的新途径。为了实现方法的实用化,在今后的工作中还需要对方法的推广性进行进一步研究,以满足大多数场合的应用需求。

### 参 考 文 献

- 1 J. C. Mullikin, L. J. van Vliet, H. Netten *et al.*. Methods for CCD camera characterization[C]. *SPIE*, 1994, **2173**: 73~84
- 2 Ralf Widenhorn, Lars Mundermann, Armin Rest *et al.*. Meyer-Neldel rule for dark current in charge-coupled device[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(2): 8179~8182
- 3 Ralf Widenhorn, Ines Hartwig, Justin C. Dunlap *et al.*. Measurement of dark current in a CCD imager during light exposure[C]. *SPIE*, 2008, **6816**: 68160B
- 4 Richard L. Baer. A model for dark current characterization and simulation[C]. *SPIE*, 2006, **6068**: 606805
- 5 Ren Huanhuan, Yuan Ping, He Jianwei *et al.*. Study of the radiation calibration of TDI-CCD spatial stereo camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~104
- 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
- 6 Song Zongxi, Zhao Baochang, Gao Wei *et al.*. Focal plane design of Chang'e-1 satellite CCD stereo-camera and laboratory radiation calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3508~3514
- 宋宗玺, 赵葆常, 高伟等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机焦面设计与辐射定标[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3508~3514
- 7 Liu Jun, Zhao Jinbin, Liu Weijun *et al.*. Gene chip microarray fluorescent spots images CCD scanning and acquiring system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 505~509
- 刘军, 赵吉宾, 刘伟军等. 基因芯片荧光靶点阵列图像 CCD 扫描采集系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 505~509
- 8 J. R. Janesick. *Scientific Charge-Coupled Devices* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001. 105~106
- 9 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
- 10 Zhang Huige, Wang Zhebin, Zhang Wenhai. Linearity slope and nonlinear scale for CCD sampling and collecting system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(8): 1313~1316
- 张惠鸽, 王哲斌, 张文海. CCD 采集系统线性斜率及非线性研究[J]. *强激光与离子束*, 2008, **20**(8): 1313~1316

栏目编辑: 何卓铭

## 4 结 论

根据实验分析和验证,基于场景坏点检测的面