

# 可见光面阵 CCD 响应非均匀性的检测与校正

刘妍妍<sup>1</sup>, 李国宁<sup>2</sup>, 张瑜<sup>1</sup>, 李洪祚<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022, E-mail: Liuyy306@163.com;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 通过分析可见光面阵 CCD 的响应非均匀性, 提出了一种适用于所有面阵 CCD 的响应非均匀性检测系统。利用该检测系统对全帧型面阵 CCD485 进行了辐射定标, 建立了面阵 CCD485 数字图像的灰度值和积分球出口处辐照度之间的响应关系, 并描绘了响应度曲线。从定标采集得到的数字图像可以看出灰度值有明显的跳跃, 响应非均匀性已经超过了 5%, 在微光拍照时将严重影响成像的质量, 所以必须进行校正。根据面阵 CCD 响应度曲线来选择非均匀性校正算法, 考虑到面阵 CCD485 的响应度为线性, 这里采用了两点校正算法, 求出面阵 CCD 各个像元的校正因子(增益和偏置), 并存储到校正矩阵中, 通过乘积加法运算把各个像元的信号校正成面阵 CCD 的平均信号值。实验结果表明, 两点校正算法使面阵 CCD485 的响应非均匀性降低到原来的 1/10 左右, 是一种实用有效的校正方法。

**关键词:** 面阵 CCD; 响应度; 非均匀性校正; 两点校正算法

**中图分类号:** TN386.5

**文献标识码:** A

## Detection and Correction of Response Non-Uniformity Based on Visible Light Area CCD

LIU Yan-yan<sup>1</sup>, LI Guo-ning<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, LI Hong-zuo<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,

Changchun 130033, China, E-mail: Liuyy306@163.com;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Through analyzing response non-uniformity of visible light area CCD, a kind of system that is used to response non-uniformity detection had been presented, and it is applied to all kinds of area CCD. After radiation scale was done for area CCD485 with this system, the respond relation was established between the gray value of digital image and radiation luminance which integration sphere exported, and responsibility curve was also described. From the digital image that can be gathered, it can be find out the gray value have obvious jump, response non-uniformity has exceeded 5%. When taking pictures under weak light, it will be serious to affect the quality of pictures, so must be rectified. Correction algorithm is selected according to the responsibility curve of area CCD. Because of the area CCD485's responsibility is linear, so here have adopted two-point correction algorithm, calculate the correction factors (gain and offset) of all pixels, and put them into correction matrix. Through multiplication and addition operation, the signal of every pixel is rectified into the average signal of area CCD. Experiment result shows that two-point correction algorithm makes response non-uniformity of CCD485 arrive original 1/10, it is a practical effective method of correction.

**收稿日期:** 2009-12-23; **修订日期:** 2010-01-15

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

**作者简介:** 刘妍妍(1981-), 女, 吉林洮南人, 讲师, 硕士, 主要从事光电成像技术、数字图像处理等方面的研究。

**Key words:** area CCD; responsibility; non-uniformity correction; two-point correction algorithm

## 1 引 言

电荷耦合器件 (Charge Coupled Devices, CCD) 是一种技术成熟、应用广泛的图像传感器, 已成为高端数字摄像的主流器件。在 CCD 成像系统中, 当 CCD 被一个完全均匀的光场照射时, 理论上每个 CCD 光敏单元的输出应该是完全相同的, 但事实上它们的输出会有差异。CCD 各个光敏单元这种响应的差异称为 CCD 响应非均匀性。如果采用未经过校正的 CCD 直接捕获一个灰度均匀的目标时, 可能会输出强度不均匀的目标图像, 这将对目标识别及其后续图像处理中的目标特征提取与测量不利, 特别是在高精度测量系统中响应非均匀性对成像质量有更大影响<sup>[1-3]</sup>, 必须进行非均匀性校正。根据 CCD 器件结构的不同, CCD 可分为线阵 CCD 和面阵 CCD。CCD 的响应非均匀性与制作工艺过程以及后续电路处理等都有关系, 面阵 CCD 传感器的规模越大, 其响应非均匀性问题就越突出。非均匀性校正之前必须对 CCD 的响应非均匀性准确测量, 测量过程中受光源的不均匀性影响很大。实时校正过程受面阵 CCD 的输出像元数和输出通道数影响很大, 输出像元数和输出通道越多, 实时校正过程就越复杂。因此, 对于大规模面阵 CCD 来说, 响应非均匀性的准确测量和实时校正难度很大。

本文通过分析可见光面阵 CCD 的响应非均匀性, 提出一种适合于所有可见光面阵 CCD 的响应非均匀性检测系统, 根据响应非均匀性的特点, 提出实用有效的校正方法以提高成像质量。

## 2 可见光面阵 CCD 非均匀性分析

面阵 CCD 自身的非均匀性与材料质量和工艺过程都有关系, 如沟道掺杂浓度和表面态密度的不均匀、栅氧化物厚度的变化等<sup>[4]</sup>; 光敏元的尺寸差异所引起的有效面积的不一致性也是非均匀性产生的因素。除了制版、光刻精度等影响光敏元的面积外, 腐蚀工艺控制的好坏也直接影响均匀性, 而器件转移效率的不一致也有影响。通常 CCD 的非均匀性要求控制在 5% 的范围内, 但在

微光拍照情况下, 要求拍摄图像质量很高时, 非均匀性将严重影响到面阵 CCD 的成像质量, 所以非均匀性必须降低到更低的范围内。

CCD 响应非均匀性 (PRUN) 一般定义为: 各光敏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。非均匀性的数学表达式为:

$$k_{\text{PRUN}} = \frac{1}{\bar{V}_s} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (V_{s_i} - \bar{V}_s)^2} \quad (1)$$

式中,  $V_{s_i}$  为第  $i$  个光敏元的输出信号,  $\bar{V}_s$  为各个光敏元输出信号的平均值,  $N$  为光敏元的数目。

本文以全帧型面阵 CCD485 作为研究对象来说明面阵 CCD 非均匀性的检测与校正, 面阵 CCD485 的非均匀性最大为 10%, 在微光下已经严重影响到成像质量, 所以必须进行校正。全帧型面阵 CCD 的全部感光区都用于成像, 没有用于暂时存储感光信息的寄存器, 所有信息必须保留在光敏单元本身, 所以采用这种面阵 CCD 就必须借助机械快门来控制曝光量。

## 3 可见光面阵 CCD 非均匀性检测系统

可见光面阵 CCD 非均匀性检测系统是由积分球、硅探测器、可见光面阵 CCD、视频处理器、高速图像采集卡、图像存储、非均匀性校正和 CRT 显示几部分组成, 其结构如图 1 所示。

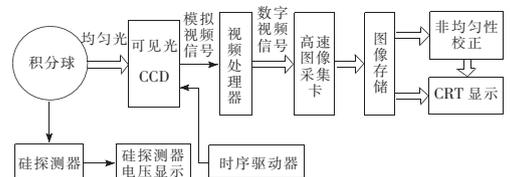


图 1 非均匀性检测系统结构框图

Fig. 1 Construction of non-uniformity detection system

积分球由球体、照明灯组和硅探测器组成, 它模拟在不同太阳天顶角和地物反射率的情况下, 地面辐亮度和天空后向散射形成的总辐亮度。在积分球光源出口处输出为均匀光, 通过调节积分球内灯的个数来控制出口处输出光源辐亮度的大

小,用定标过的幅亮度计测积分球出光口处幅亮度,确定积分球幅亮度,并与积分球内设置的硅探测器相比较,确定积分球内监控用的硅探测器输出电压与幅亮度之间的关系。在非均匀性检测过程中,可以用积分球内设置的硅探测器输出电压算得积分球光源出口处的幅亮度值,检测时将面阵 CCD 及其后续处理电路放置在积分球出口处,使面阵 CCD 感光面正对积分球出口。由于本文采用的全帧型面阵 CCD,所以在面阵 CCD 前端要加上机械快门。机械快门的速度通过 CCD 的响应灵敏度来计算,面阵 CCD485 的快门速度控制在  $\frac{1}{700} \sim \frac{1}{1500}$  s。如果面阵 CCD 有电子快门,这里就不需要机械快门。视频处理器的作用就是对面阵 CCD 输出的视频信号进行低噪声放大,经过相关双采样电路对 CCD 输出视频信号的复位噪声、低频噪声和宽带白噪声进行消除和抑制<sup>[5]</sup>,并且对系统的增益和偏置进行调整,最终经过 A/D 转换为数字视频信号。数字视频信息通过高速图像采集卡存储到 PC 机上,由 PC 机软件来完成图像显示和非均匀性校正。

#### 4 面阵 CCD 非均匀性定标

在非均匀性校正前,要对全帧型面阵 CCD 进行定标,定标就是在积分球出口处输出多个不同等级辐照度的均匀光,在不同的辐照度下拍摄并存储多幅图像,测量面阵 CCD 的响应灵敏度和线性度,然后根据 CCD 响应线性度选择非均匀性校正方法。由于是对 CCD 裸片进行定标和校正,所以定标过程必须在暗室内操作,而且 CCD 裸片和后续处理电路要放在黑色防静电箱内<sup>[6]</sup>。面阵 CCD 响应度可以由入射光的响应灵敏度和暗电流进行表征,可简单地表示为:

$$\overline{X(\varphi_k)} = A \cdot \varphi_k + \bar{C}, k = 1 \cdots m \quad (2)$$

式中,  $A$  表示面阵 CCD 的响应灵敏度;  $\varphi_k$  表示积分球出口处辐照度;  $k$  表示选取定标点的个数,这里选取  $m$  个定标点;  $\overline{X(\varphi_k)}$  表示在辐照度为  $\varphi_k$  时面阵 CCD 所有像元输出信号的平均值;  $\bar{C}$  表示面阵 CCD 所有像元暗电流信号的平均值。

首先,在没有光照的情况下测量面阵 CCD 的暗电流信号,也就是图像的本底。然后在每个定标点处,采集并存储相应的数字图像。对于每个辐照度,全帧型面阵 CCD 每个像元输出的信号值

不完全相同,在某一个信号值的上下波动,所以定标时将所有像元输出信号值的均值作为图像输出的信号值。在图像采集过程中不可避免地存在随机噪声,它将干扰非均匀性校正的结果,随机噪声属于正态分布,它的数学期望为 0。因此,无论采集暗电流图像信号还是每个定标点处的图像信号,都需要连续采集 100 帧图像数据,求平均可以去掉随机噪声的影响<sup>[7]</sup>。

面阵 CCD 响应度曲线如图 2 所示,由于采集的数字图像表示为 8 位,所以图像灰度等级为 0~255。图 2(a)是理论上的面阵 CCD 响应度曲线,响应度曲线应该是完全线性的。图 2(b)是实际测得的面阵 CCD485 响应度曲线,本文选取 50 个积分球辐照度,通过定标,可以看出面阵 CCD 485 的响应度曲线是接近线性的,这为下一步校正方法的选取提供了前提条件,通过曲线拟合,面阵 CCD 485 的响应度公式为:

$$\begin{aligned} \overline{X(\varphi_k)} &= 0.526 \cdot \varphi_k - 20.08 \\ k &= 1, 2, \dots, 50 \end{aligned} \quad (3)$$

为了进一步分析,选取一个定标点,当辐照度  $\varphi = 245.427 \text{ W/m}^2$  时,从获取的原图中截取一幅像元

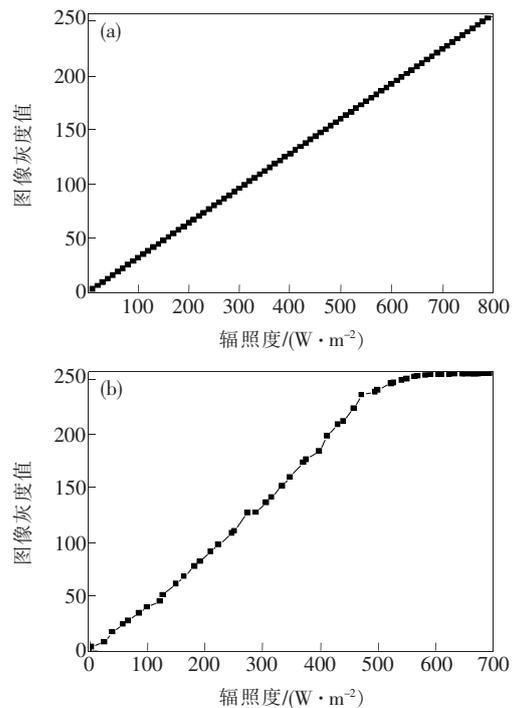


图 2 面阵 CCD485 的响应度曲线。(a)理论面阵 CCD 的响应度曲线;(b)实际面阵 CCD485 的响应度曲线。

Fig. 2 Responsibility curve of area CCD485. (a) Theoretical responsibility curve of area CCD; (b) Actual responsibility curve of area CCD485.

数为  $100 \times 100$  的图像,如图 3 所示。从图中可以看出,图像有很多灰度值不等的条纹,在微光拍摄情况下,这种条纹将严重影响成像的质量。图 4 显示了被截取的原图灰度值立体分布,灰度值在 105~118 之间,像元响应非均匀性较大,所以必须进行校正。



图 3 校正前截取的原图

Fig. 3 Original picture that cut out before correcting

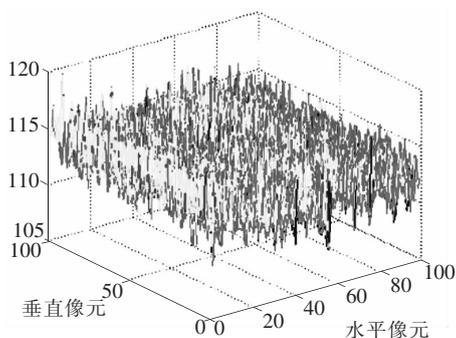


图 4 原图的灰度值立体分布

Fig. 4 Cube of gray value of original picture

## 5 面阵 CCD 非均匀性校正

根据面阵 CCD 响应线性度的不同,响应非均匀性校正可以采用单点、两点和多点校正方法<sup>[8]</sup>。由于单点校正法只是当积分球在一种辐照度输出时将不同的像元输出信号校正成平均信号,具有一定的局限性;当面阵 CCD 响应度为线性时,采用两点校正法,即在两种辐照度输出时把面阵 CCD 各个像元的输出信号分别校正为一致;如果面阵 CCD 的响应为非线性,则采用多点定标分段校正,即把定标区间分成很多段,在每个段内将面阵 CCD 的非线性响应当作线性响应来处理,方法同两点定标校正算法,但随着定标点越多,计算的数据量就越大。在本文中,由于面阵 CCD485 的响应度为线性,所以非均匀性校正采用两点校正

法最佳。

面阵 CCD 每个像元的灵敏度响应及暗电流都不可能完全相同,因此,每一个像元都有其不同的响应系数。为了和定标时面阵 CCD 响应度表达式区分开,这里把每个像元的灵敏度响应及暗电流描述成增益和偏移量,这两个量统称为校正因子,由此可以建立如下模型:

$$\overline{X(\varphi)} = a_{ij} X_{ij}(\varphi) + b_{ij}$$

$$i = 0, 1, \dots, M-1; j = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

式中,  $\overline{X(\varphi)}$  表示在辐照度为  $\varphi$  时面阵 CCD 所有像元的平均灰度值,校正后要使其其他像元的灰度值都向这个平均灰度值转换;  $X_{ij}(\varphi)$  表示未经校正的面阵 CCD 第  $i$  行第  $j$  列像元的实际输出灰度值;  $a_{ij}$  表示面阵 CCD 第  $i$  行第  $j$  列像元的增益;  $b_{ij}$  表示面阵 CCD 第  $i$  行第  $j$  列像元的偏移量;  $M$  和  $N$  分别为面阵 CCD 有效像元的行数和列数,对于面阵 CCD485,  $M$  和  $N$  分别为 4 096 和 4 097。

两点校正方法需要选取两个定标点  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ ,得两个方程:

$$\overline{X(\varphi_1)} = a_{ij} X_{ij}(\varphi_1) + b_{ij} \quad (5)$$

$$\overline{X(\varphi_2)} = a_{ij} X_{ij}(\varphi_2) + b_{ij} \quad (6)$$

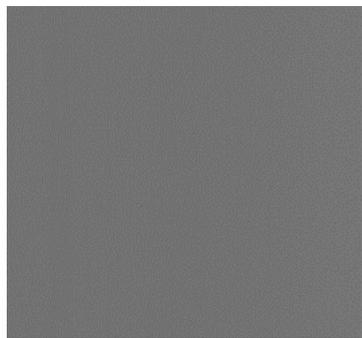


图 5 校正后的图像

Fig. 5 Corrected picture

由式(4)、(5)可推导出面阵 CCD 各个像元的增益和偏移量:

$$a_{ij} = \frac{\overline{X(\varphi_1)} - \overline{X(\varphi_2)}}{X_{ij}(\varphi_1) - X_{ij}(\varphi_2)} \quad (7)$$

$$b_{ij} = \frac{X_{ij}(\varphi_1) \overline{X(\varphi_2)} - X_{ij}(\varphi_2) \overline{X(\varphi_1)}}{X_{ij}(\varphi_1) - X_{ij}(\varphi_2)} \quad (8)$$

求出面阵 CCD 各个像元的增益和偏移量,将它们存到相应的存储单元中,然后将实际的像元响应信号与各自的增益相乘,再加上偏移量,实现面阵

CCD 每个像素在相同辐照条件下具有相同的响应输出,即完成非均匀性校正。

对图 3 进行校正后的图像如图 5 所示,图像灰度值在 110~115 之间。图 5 的灰度值立体分布如图 6 所示,可以看出非均匀性得到了明显改善。

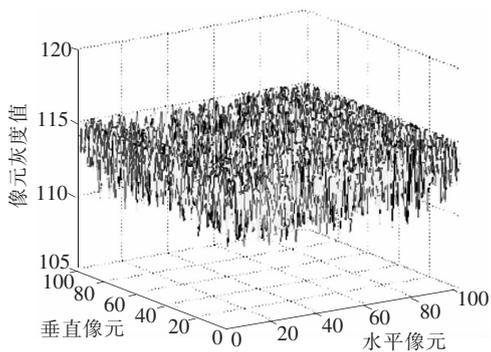


图 6 校正后图像灰度值的立体分布

Fig. 6 Cube of gray value of corrected picture

## 6 非均匀性校正结果分析

从图 3 可以看出,未校正前的图像所对应的灰度值之间有明显的差异,而经过两点校正后的图像看起来很均匀。为了说明两点校正算法的性能,选取了 4 个辐照度点的图像,分别做了校正前和校正后非均匀性分析,如表 1 所示。从表中可以看出,经过校正的面阵 CCD485 的非

表 1 校正前和校正后非均匀性比较

Table 1 Comparison of response non-uniformity before correcting and after correcting

积分球出口处 辐照度(W/m <sup>2</sup> )	校正前 非均匀性	校正后 非均匀性
66.13	0.053 6	0.005 4
148.88	0.048 4	0.004 8
222.46	0.045 9	0.004 6
286.80	0.042 1	0.004 9

均匀性降低到原来的 1/10 左右,非均匀性得到明显改善。

## 7 结 论

对可见光面阵 CCD 的非均匀性进行了分析,建立了通用的面阵 CCD 响应非均匀性的检测系统。利用该系统对全帧型面阵 CCD485 进行了辐射定标,通过定标可以得出它的非均匀性已经达到了 5%,这将对成像质量造成很大影响。利用定标建立的面阵 CCD485 的响应度曲线,采用两点校正算法对面阵 CCD 的非均匀性进行了校正。从校正后图像灰度值的立体分布图可以看出,面阵 CCD485 的非均匀性已经得到了明显改善。实验结果表明,两点校正算法使面阵 CCD485 的响应非均匀性降低到原来的 1/10 左右,是一种实用有效的校正方法。

## 参 考 文 献:

[1] 商小川,周辉,张星祥,等. 基于 FPGA 的大面阵 CCD 高帧频驱动电路设计[J]. 液晶与显示,2009,24(5):735-740.  
 [2] 罗华,张元. 基于测量最小可分辨对比度的 CCD 相机成像质量的评价[J]. 光子学报,2009,38(3):681-684.  
 [3] 马元,胡军. CCD 成像单元仿真系统的实时显示方法研究[J]. 液晶与显示,2009,24(6):922-928.  
 [4] 王庆有. 图像传感器应用技术 [M]. 北京:电子工业出版社,2006:343-414.  
 [5] 佟首峰,阮锦,郝志航. CCD 图像传感器降噪技术的研究[J]. 光学精密工程,2000,8(2):140-146.  
 [6] 王军,杨会岭. 多 CCD 拼接相机中图像传感器不均匀性校正[J]. 半导体光电,2005,26(3):261-263.  
 [7] 刘亚侠,阮锦,郝志航. 线阵 TDI CCD 遥感相机非均匀性校正的试验研究[J]. 光学技术,2003,29(6):749-751.  
 [8] 胡贵红,陈浅,沈晓燕. 红外焦平面探测器响应非线性的测定[J]. 光电子·激光,2003,5(14):489-492.