

## 强激光近场分布测量中科学级 CCD 的非均匀性校正

蔺 辉<sup>1</sup>, 刘立力<sup>1</sup>, 田新锋<sup>1</sup>, 郝 芸<sup>2</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 陕西凌云科技有限公司, 陕西 西安 710119)

**摘 要:** 首先分析了引起 CCD 非均匀性的原因, 将其归纳为两个方面, 一为因制作工艺、材料、偏置等因素引起的空间噪声, 二为 CCD 响应特性随时间的漂移而引起的时间噪声, 两者的共同作用将严重影响 CCD 的测量性能。为了能够定量描述空间噪声和时间噪声对 CCD 产生非均匀性的影响, 文中基于 CCD 光电响应曲线呈线性状态这一假设建立了 CCD 光电响应的数学模型, 然后在该模型的基础上提出了利用最小二乘法来估计校正系数, 从而消除 CCD 的非均匀性, 实验证明该算法是有效的。

**关键词:** 非均匀性校正; 最小二乘法; CCD

**中图分类号:** TN386.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2108-04

## Correct non-uniformity of scientific grade CCD in measuring laser near field distributing

Lin Hui<sup>1</sup>, Liu Lili<sup>1</sup>, Tian Xinfeng<sup>1</sup>, Hao Yun<sup>2</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. China Shaanxi Lingyun Technology Company, Ltd, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** The reason of photo response non-uniformity (PRNU) of image sensor's photo response was analyzed in this paper at first. It was concluded in two faces, one caused by spatial noise which based on materials, manufacture crafts and offset and another caused by temporal noise which based on its response with time drift, theses two factors influence the PRNU of image sensor's photo response gravely. To describe the affection of spatial noise and temporal noise, the model of sensor based on the hypothesis that linear of image sensor's photo response was made, and the erase non-uniformity of CCD by Least Square Methods based on this model was proposed. Experiment results show that the proposed algorithm is effective to the correction of image sensor's PRNU.

**Key words:** correct non-uniformity; least square methods; CCD

收稿日期: 2013-11-21; 修订日期: 2013-12-24

基金项目: 国家高技术惯性约束领域项目(YO1Z531BOA)

作者简介: 蔺辉(1980-), 男, 工程师, 博士生, 从事科学级 CCD 方面的研究。Email: mail198047@163.com

导师简介: 苏秀琴(1965-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事图像处理方面的研究。Email: xqsu@opt.ac.cn

## 0 引言

CCD 器件以其量子效率高,动态范围大,分辨率高,输出噪声低,电荷转移效率高及光谱响应范围宽等优点在科学测量中获得了越来越广泛的应用。在对高能激光束能量分布测量中,科学级 CCD 是核心器件,但是,由于制作工艺、材料、偏置、温度等多种因素的影响,CCD 靶面对光能量的响应并不均匀,这将导致测量误差增大,为了有效解决这一问题,就需要对 CCD 的非均匀性进行离线或在线的校正,以提高测量精度。

目前,非均匀性校正的思路主要有两种,第一种是采用定标的方式离线估计校正参数,常用的有一点定标法、两点定标法及多点定标法。一点定标法和两点定标法均是基于光电响应线性这一假设,优点是算法简单,运算量小,缺点是校正精度不高,基本没有使用价值。而多点定标法则充分考虑了光电响应非线性这一现实,提高了校正精度,扩大了校正的范围,但缺点是运算量太大,实用价值不高。第二种校正的思路是基于场景的校正方法,该方法可以在线更新校正系数,方便实时校正。恒定统计法、恒定范围统计法和卡尔曼滤波法都属于这一类型。恒定统计法和恒定范围统计法均未利用响应参数的漂移信息,当响应参数变化时,增益和偏置需要全面的重新估计。卡尔曼滤波法的校正精度取决于状态模型中漂移系数的选取,实际应用中,由于响应特性的随机性严重影响了校正的性能。文中分析比照各种校正算法,建立 CCD 非均匀性动态模型,提出利用最小二乘法动态地辨识响应特性参数以实现校正<sup>[1-2]</sup>。

## 1 科学级 CCD 非均匀性分析及校正模型的建立

实际应用中,CCD 光电响应特性参数会随时间漂移,使其响应曲线呈非线性,为了使校正算法充分考虑非线性的影响,往往通过分段线性的方法来近似逼近非线性曲线。假设在时刻  $t$  附近,CCD 的光电响应严格线性,由此建立时刻  $t$  的线性模型,进而通过各个时刻的线性模型来近似 CCD 整个工作区域的非线性模型<sup>[3]</sup>。

$$v_c(i, j, t) = a(t)\varphi(i, j, t) + b(t) \quad (1)$$

式中: $\varphi(i, j, t)$ 是  $t$  时刻第  $(i, j)$  光敏元接受的光辐照

量; $v_c(i, j, t)$ 是没有非均匀性影响的理想灰度响应,即校正后的值; $a(t)$ 为理想的增益系数; $b(t)$ 为理想的偏置量。

因非均匀性的影响,各光敏元的增益系数和偏置量会偏移理想值,记  $t$  时刻光敏元  $(i, j)$  的增益系数为  $a(i, j, t)$ ,偏置量为  $b(i, j, t)$ ,则:

$$v(i, j, t) = a(i, j, t)\varphi(i, j, t) + b(i, j, t) \quad (2)$$

$$a(i, j, t) = a(t) + \delta(i, j, t) \quad (3)$$

$$b(i, j, t) = b(t) + \eta(i, j, t) \quad (4)$$

此是  $t$  时刻  $(i, j)$  光敏元的光电响应模型,其中, $\delta(i, j, t)$ 和  $\eta(i, j, t)$ 分别是增益与偏置在理想值上的偏移量,这里假定 CCD 的光电响应特性是线性时变的。

由公式(1)~(4)可以导出线性时变校正模型:

$$v(i, j, t) = c_1(i, j, t)v_c(i, j, t) + c_2(i, j, t)$$

$$c_1(i, j, t) = 1 + \frac{\delta(i, j, t)}{a(t)}$$

$$c_2(i, j, t) = \eta(i, j, t) - \frac{b(t)}{a(t)}\delta(i, j, t) \quad (5)$$

若忽略响应特性参数随时间的漂移,便可得到线性非时变校正模型:

$$v(i, j, t) = c_1(i, j)v_c(i, j, t) + c_2(i, j)$$

$$c_1(i, j) = 1 + \frac{\delta(i, j)}{a}$$

$$c_2(i, j) = \eta(i, j) - \frac{b}{a}\delta(i, j) \quad (6)$$

## 2 基于线性非时变校正模型的非均匀性校正算法

根据公式(6)描述的线性非时变校正模型,文中提出用最小二乘法离线估计校正参数  $c_1$  和  $c_2$ ,进而实现校正,具体步骤如下:

(1) 在相机的工作范围内,离线选取一组定标点  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ , 在每个定标点  $\varphi_k$  上,用均匀光覆盖 CCD 靶面的全部,并获取图像数据矩阵  $V_k$ 。

(2) 计算输入数据矩阵  $V_c; V_c = \begin{pmatrix} \overline{V}_1, 1 \\ \overline{V}_2, 1 \\ \dots \\ \overline{V}_n, 1 \end{pmatrix}$ , 其中,

$\overline{V}_k = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1, j=1}^{N, M} V_k(i, j)$ ,  $N$  和  $M$  分别是图像数据矩阵  $V_k$  行和列的维数。

(3) 按照最小二乘法估计光敏元  $(i, j)$  的校正系数  $c_1(i, j)$  和  $c_2(i, j)$ ;  $\begin{pmatrix} c_1(i, j) \\ c_2(i, j) \end{pmatrix} = (V_c^T \Delta V_c)^{-1} V_c^T \Delta V_{i, j}$ , 其中,

$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix}$  是权值矩阵,  $\mathbf{V}_{i,j} = (V_1(i,j), V_2(i,j), \dots, V_n(i,j))^T$  是第  $(i,j)$  光敏元的观测向量。

(4) 称  $\mathbf{c}_1$  为增益校正矩阵,  $\mathbf{c}_2$  为偏置校正矩阵。对于该款 CCD 获取的任何图像数据均可以根据增益校正矩阵和偏置校正矩阵按照下面的公式实现校正<sup>[4-7]</sup>。

$$v_c(i,j) = \frac{v(i,j) - c_2(i,j)}{c_1(i,j)} \quad (7)$$

### 3 实验分析

按照文中所述的标定方法,对一款科学级 CCD 进行了标定。非线性度取 3%,获得的线性动态范围为 127,线性工作区处在 [1.03 CD, 133.0 CD],信噪比为 34 dB。按照本装置对科学级 CCD 的使用要求,要能够分辨激光脉冲峰值能量的 1%,所以 127 倍的线性动态范围已足以满足使用,对弱信号的有效分辨至少大于噪声值的 10 倍,34 dB 的信噪比也远远高于此要求。

为了验证文中所述的非均匀性校正算法的有效性,对 CCD 工作在线性工作区所获得的数据进行校正,校正前后的非均匀指标对比如表 1 所列。从表中可以看出,文中给出的校正算法取得了非常好的校正效果,基本上可以将非均匀性校正到 1% 以下。为了更直观的看到校正前后 CCD 像元的灰度变化曲线,特意选取第 512 列和 512 行校正前后的变化曲线作一对比(如图 1~4 所示),从图中可以看出,经校正后,由 CCD 非均匀性引起的空间噪声被有效抑制<sup>[8]</sup>。

表 1 不同光强下校正前后的非均匀性对比

Tab.1 Compare value of non-uniformity in different intention of light intensity

Light intensity	Average gray value	Before correction	After correction
5.7	3 042.9	1.23%	0.78%
11.8	4 167.1	1.36%	0.46%
19.7	5 558.3	1.39%	0.42%
30.3	7 446.8	1.43%	0.34%
40.1	9 214.8	1.64%	0.27%
51.0	11 227	1.69%	0.25%
60.5	13 023	1.67%	0.23%
71.1	15 046	1.72%	0.21%

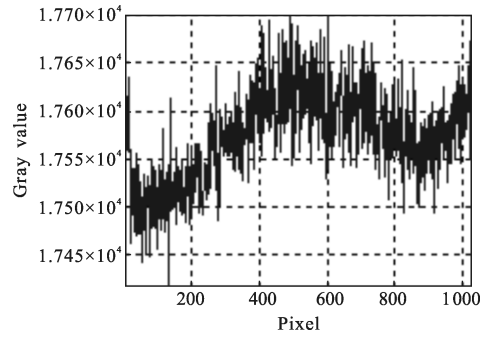


图 1 校正前第 512 行的灰度曲线

Fig.1 Gray scale of row 512 before correction

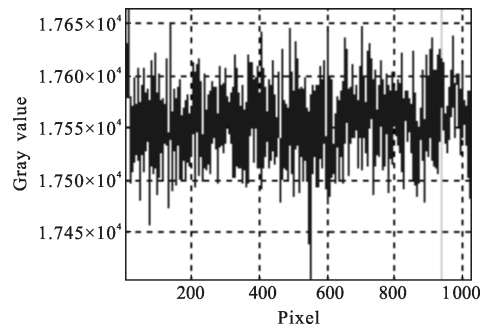


图 2 校正后第 512 行的灰度曲线

Fig.2 Gray scale of row 512 after correction

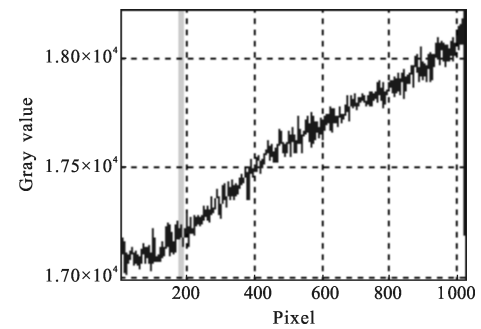


图 3 校正前第 512 列的灰度变化曲线

Fig.3 Gray scale of arrange 512 before correction

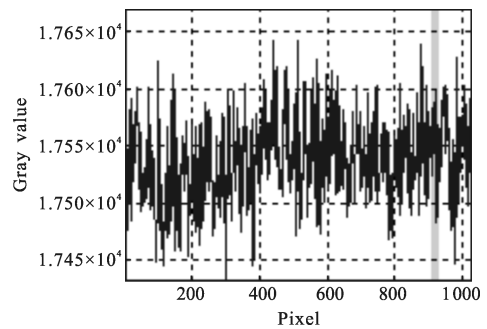


图 4 校正后第 512 列的灰度变化曲线

Fig.4 Gray scale of arrange 512 after correction

## 4 结论

文中围绕高功率激光参数测量装置中对科学级 CCD 的使用要求,设计指标标定方法,并以此为选择 CCD 的光学指标依据。为了提高科学级 CCD 面响应的均匀性,文中基于 CCD 光电响应的线性模型推导出了线性校正算法,本算法适合 CCD 工作在线性区的非均匀性校正,经实验验证,该算法取得了良好的效果。

### 参考文献:

- [1] Liu Yaxia, Ruan Jin, Hao Zhihang. Research on the nonuniformity correction of linear TDI CCD remote camera [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(6): 749-751. (in Chinese)  
刘亚侠, 阮锦, 郝志航. 线阵 TDI CCD 遥感相机非均匀性校正的研究[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 749-751.
- [2] Wang Bingjian, Liu Shangqian, Li Qing. Real-time nonuniformity correction of IRFPA based on FPGA [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, 29(1): 79-82. (in Chinese)  
王炳健, 刘上乾, 李庆. 基于 FPGA 的红外焦平面阵列实时非均匀性校正[J]. 半导体光电, 2006, 29(1): 79-82.
- [3] Zheng Xiaorao, Chen Shaolin, Mo Zhongxi, et al. Numerical Methods [M]. Wuhan: Wuhan University Publication, 2002: 280-319. (in Chinese)  
郑慧娆, 陈绍林, 莫忠息, 等. 数值计算方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 280-319.
- [4] Liu Zexun, Quan Xianrong, Ren Jianwei, et al. Calibration of CCD camera's output non-uniformity linear corrected coefficient [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2211-2215. (in Chinese)  
刘则洵, 全先荣, 任建伟, 等. CCD 相机输出非均匀性线性校正系数的定标 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2211-2215.
- [5] Su Chengzhi, Chen Dong, Cao Guohua, et al. Reducing the influence of non-uniformity of luminous intensity on the inhomogeneity correction for CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 680-684. (in Chinese)  
苏成志, 陈栋, 曹国华, 等. 减小光强不均对 CCD 非均匀性校正的影响 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 680-684.
- [6] Cai Rongtai, Sun Honghai, Wang Yani, et al. Chip design of linear CCD drive pulse generator and control interface[C]// SPIE, 2006, 6149: 6149D1-7.
- [7] Mann S. Comparametric equations with practical applications in quantigraphic image processing [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2000, 9(8): 1389-1406.
- [8] Zhou Huixin, Liu Shangqian, Lai Rui, et al. Solution for nonuniformity corection of infrared focal plane arrays [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(15): 2928-2932.