

文章编号 1004-924X(2009)12-3084-05

多 TDI-CCD 拼接相机成像非均匀性的校正

岳俊华^{1,2,3}, 李 岩¹, 武学颖^{1,2}, 司国良¹, 郭永飞¹

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

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 吉林建筑工程学院, 吉林 长春 130021)

摘要:针对多 TDI-CCD 拼接相机存在成像非均匀性问题,开展了对拼接相机输出图像的片内及片间综合校正算法研究。结合 CCD 相机特性介绍了 TDI-CCD 的工作原理以及拼接相机成像非均匀性的产生机理。然后,分别对拼接相机片内及片间非均匀性校正的原理进行分析,提出了片内采用两点法校正,片间采用比值平均综合法校正。最后,对片内及片间综合非均匀性校正的参数标定及校正方法进行了探讨。实验结果表明,对存在 8.4%非均匀性的原拼接输出图像,采用片内与片间综合校正法校正后,图像非均匀性达到了 2.7%,表明该校正方法可基本满足 TDI-CCD 拼接相机对成像非均匀性校正的要求,其算法有效实用。

关键词:TDI-CCD; 拼接相机; 非均匀性; 图像校正

中图分类号:V447.3;TN386.5 **文献标识码:**A

Correction of imaging non-uniformity for multi-TDICCD mosaic camera

YUE Jun-hua^{1,2,3}, LI Yan¹, WU Xue-ying^{1,2}, SI Guo-liang¹, GUO Yong-fei¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: Aiming at the imaging non-uniformity problem of a multi-TDI-CCD mosaic camera, the syn-
thetical correction algorithms about the single TDI-CCD and multi TDI-CCD are studied. Based on
CCD camera characteristics, the principles of TDI-CCD and non-uniformity generation are introduced.
Then the working principles of the single and multi TDI-CCD are analyzed, respectively. The two-point
correction method is applied to the single TDI-CCD and the ratio average correction method is applied
to the multi TDI-CCD. Finally, the synthetical correction method is discussed. Experimental results
indicate that the imaging non-uniformity of the multi-TDI-CCD mosaic camera corrected by proposed
method has reached 2.7% for a original image with non-uniformity of 84%, which proves that this cor-
rection method satisfies the requirements of the target of the multi-TDI-CCD camera, and the algo-
rithm has good practicality and efficiency.

Key words: TDI-CCD; mosaic camera; non-uniformity; image correction

收稿日期:2008-11-20;修订日期:2008-12-23.

基金项目:长春市科技攻关资助项目(No. 07163UC080)

1 引言

TDI-CCD 相机是一种具有多重级数延时积分功能的线阵输出相机,由于其在低照度情况下具有良好的成像性能,因此近年来广泛应用于航天遥感卫星成像领域^[1]。受到技术和工艺水平限制,目前单片 TDI-CCD 芯片的成像像元数无法满足遥感成像对视场宽度的要求。TDI-CCD 拼接就是为了在现有技术条件下实现宽视场成像而研制的一项专用相机开发技术,该技术利用多片拼接,达到扩大相机有效视场的目的。

CCD 成像器件由于不同的光敏单元间存在一定光电响应不一致性,会导致成像的非均匀性,这种非均匀性会严重影响成像质量,必须加以校正^[2]。CCD 成像器件各成像像元的光电响应特性与照度间符合线性关系,可以通过线性修正对各输出信号进行归一化处理,这也就是对 CCD 成像非均匀性校正的理论基础^[3]。TDI-CCD 作为具有多级成像单元的器件,其每一级成像单元都相当于一条线阵 CCD 成像器件,各级成像器件对同一景象进行精密控制的运动同步延时曝光,通过对输出信号的积分处理获得高质量目标图像。由工作原理决定,TDI-CCD 不可避免地具有与普通 CCD 成像器件一样的非均匀性问题^[4],且其积分输出信号非均匀性与照度间同样具有线性变化特征^[5],因此也可以通过归一化处理进行非均匀性校正。

对于多 TDI-CCD 拼接相机,由于多路成像很难同时兼顾灵敏度、线性、光谱特性、几何畸变等非一致性因素的影响,片间输出图像非均匀性对成像质量影响明显。对于片间非均匀性的校正,可以在对每个单 TDI-CCD 进行片内校正之后,比对获得每个 TDI-CCD 的偏置系数,通过单片成像偏置修正的方法加以校正。

针对多 TDI-CCD 拼接相机存在的成像非均匀性问题,本文采用片内两点校正、片间偏置修正的方法实现了对片内和片间非均匀性的校正。

2 非均匀性校正原理

由于受材料和工艺水平的限制,TDI-CCD 各探测单元响应特性之间普遍存在着非均匀性,

以至使其难以满足相机成像系统的使用要求,因而需要进行非均匀性校正。对于目前出现的多种校正方法可以大致归为两类:线性校正和非线性校正。其中线性校正包括常用的两点校正法、多点校正法、恒定统计平均法等。而非线性校正包括时域高通滤波法、人工神经网络法等^[6]。线性校正需要在校正之前进行定标,即获取非均匀性校正的数据;再在校正实现过程中读取这些数据或作相应的运算,就完成了对非均匀性的校正。

2.1 片内非均匀性校正原理

由 CCD 器件的光电响应特性可知,光敏单元的输出除了接近极小或饱和状态时,在大部分响应区域内呈现良好的线性关系^[7]。以光敏单元 i 为例,若不考虑该单元与其它光敏单元的相互作用,则其输出 Y_i 可以表示为:

$$Y_i = G_i E + T_i, \quad (1)$$

式中, E 为光照度, G_i 是光敏单元 i 的光电响应系数, T_i 是 CCD 的器件本身暗电流及其驱动电路影响造成的输出(或称为输出偏移量),对于确定的 CCD 芯片和驱动电路, T_i 是不变量。

对于 TDI-CCD,由其工作原理可知,其采用多级 CCD 对同一景象进行精密控制的运动同步延时曝光,并通过对输出信号的积分处理获得目标高质量图像,因此,对于 n 级 TDI-CCD 光敏单元 i 为例,其输出 Y_{ni} 可以表示为:

$$Y_{ni} = \sum_{k=1}^n G_k E + \sum_{k=1}^n T_k = G_{ni} E + T_{ni}. \quad (2)$$

由式(2)可见,TDI-CCD 成像像元的光敏响应特性是各级成像像元光敏特性的累加,在忽略响应区域两端的情况下,可以认为 TDI-CCD 响应也是线性的。

光敏响应呈线性的成像器件,可以采用两点校正法实现对其经 A/D 转换后获得图像非均匀性的校正。归一化的两点校正公式如下^[8]:

$$Y_i' = (Y_i - Y_{i0}) \phi(i) + Y_{i0}, \quad (3)$$

式中, Y_i' : 校正后输出; Y_i : 像元实际输出; Y_{i0} : 两点标定时低照度标定实际输出; $\phi(i)$: 校正参数。

校正参数 $\phi(i)$ 通过两点标定法在实验室标定获得,校正参数 $\phi(i)$ 的获取公式如下:

$$\phi(i) = \frac{\bar{Y}_1 - Y_{i0}}{Y_{i1} - Y_{i0}}, \quad (4)$$

其中: \bar{Y}_1 为在均匀高照度标定时,TDI-CCD 各像素点输出量的平均值。

2.2 片间非均匀性校正原理

多 TDI-CCD 拼接相机片间非均匀性是由于各拼接单元参数调整无法达到完全一致所致。对成像的影响主要体现在 TDI-CCD 拼接片间对同一照度目标的成像具有一定的灰度色差。

片间校正可通过实验室色差标定的方法,获得每个拼接片相对于平均灰级的偏置参数。在进行片间校正参数测量前,首先必须完成对各拼接片的片内校正^[9]。

对于多 TDI-CCD 拼接相机,第 i 片的片间校正偏置参数 P_i 的获取公式如下:

$$P_i = \bar{Y}_i - \frac{\sum_{k=1}^n \bar{Y}_k}{n}, \quad (5)$$

式中: \bar{Y}_i 为第 i 片的实验室标定照度条件下的片内校正后的平均输出; n 为拼接片数。

片间校正公式如下:

$$Y_{ik}' = Y_{ik} \left(1 + \frac{P_i}{\bar{Y}_i} \right), \quad (6)$$

式中: Y_{ik}' : i 片 k 像元片间校正输出; Y_{ik} : i 片 k 像元片内校正输出。

3 非均匀性校正方法

多 TDI-CCD 拼接相机非均匀性校正过程针对相机 A/D 转换后获得的数字图像进行,校正分为参数标定和校正两个部分:首先通过参数标定获得非均匀性校正参数,再通过片内与片间综合校正,完成对拼接相机输出图像非均匀性的校正。

3.1 标定过程

多 TDI-CCD 拼接相机的标定过程在光照度实验室内完成,具体方法如下:

(1) 设定多 TDI-CCD 拼接相机的积分级数及相机增益,通过调整积分球输出光照度,使每个单片 TDI-CCD 相机输出接近最小输出,记录每个像元的输出数值 $\{Y_{i0}\}$;

(2) 调整积分球输出光照度,使每个单片 TDI-CCD 相机输出接近饱和输出,记录每个像元的输出数值 $\{Y_{i1}\}$;

(3) 按照公式(4)计算校正参数 $\{\phi(i)\}$;

(4) 调整积分球输出光照度,使每个单片 TDI-CCD 相机输出为中间数值,记录每个像元的输出数值 $\{Y_i\}$;

(5) 按照公式(5)计算,即可获得多 TDI-CCD 拼接相机各拼接单元的片间校正偏置参数 $\{P_i\}$;

(6) 调整积分级数及增益,通过重复上述操作,即可获得多 TDI-CCD 拼接相机在不同级数及增益下的片内校正参数矩阵 Φ 和片间校正偏置参数矩阵 P ,以及各种设置下的最低输出数据矩阵 Y_0 。

3.2 校正方法

在标定过程获得片内、片间校正参数矩阵及最低输出数据矩阵 $\{\Phi, P, Y_0\}$ 后,如果采用事后处理方式对图像进行非均匀性校正,就可以利用公式(3)和公式(6)对图像数据进行综合校正处理。

如果采用硬件实时校正,可以将参数矩阵 $\{\Phi, P, Y_0\}$ 写入相机输出处理电路的 Flash 存储器中,由 FPGA 根据相机设定工作参数(积分级数、增益等)对校正参数进行索引调用,再利用公式(3)和公式(6)的算法对 A/D 转换后输出的图像数据进行实时在线校正。

4 算法验证实验结果

为了验证综合校正算法的校正性能,我们选用由 3 片 4 096 pixel TDI-CCD 拼接相机,进行了成像非均匀性校正实验,实验是在实验室内,设定积分级数和增益条件下进行。

拼接相机输出图像校正实验图像输出效果对比如图 1 所示。

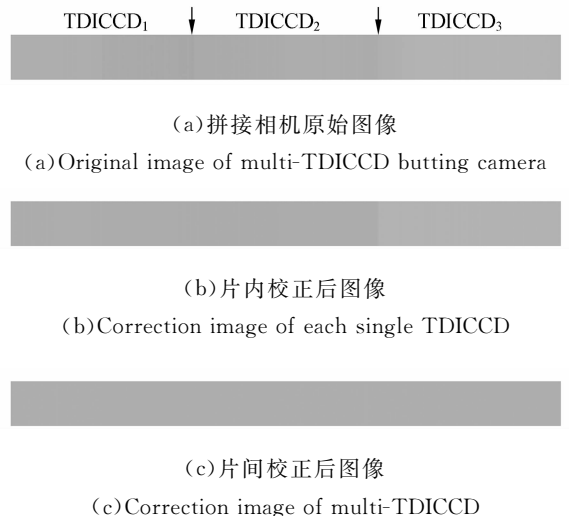
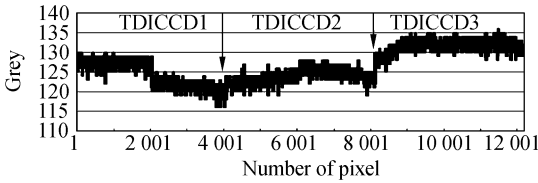


图 1 校正实验图像效果对比

Fig. 1 Comparison of image calibration experiment

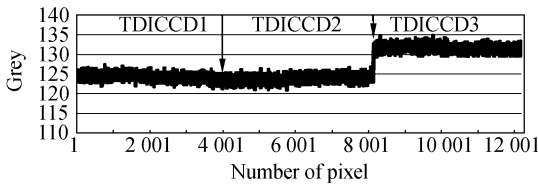
校正实验图像数据分析对比结果如图 2 所示,图中横坐标代表拼接像元数,纵坐标代表像元的灰度值。

对片内校正方法进行算法验证后,结果如表 1 所示。



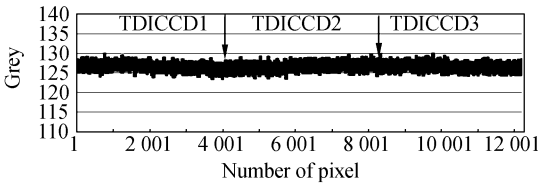
(a)原始图像数据折线图

(a)Data line-chart about original image



(b)片内校正后的图像数据折线图

(b)Data line-chart about correction image of each single TDICCD



(c)片间校正后的图像数据折线图

(c)Data line-chart about correction image of multi-TDICCD

图 2 校正实验图像数据对比

Fig. 2 Data comparison between the image calibration experiments

在片内校正完成后,进行片间校正算法验证,综合校正后的结果如表 2 所示。

表 1 多 TDI-CCD 拼接非均匀性片内校正试验结果

Tab. 1 Result of experiment about non-uniformity correction within TDI-CCD

| 参数 | 级数 | 增益 | CCD1 | | CCD2 | | CCD3 | |
|----|-----|------|------|------|------|------|------|----|
| | | | 校前 | 校后 | 校前 | 校后 | 校前 | 校后 |
| 16 | 6 | 6.5% | 2.9% | 3.9% | 2.6% | 5.0% | 2.6% | |
| | 12 | 7.5% | 3.8% | 4.7% | 4.4% | 6.3% | 3.4% | |
| 32 | 4.5 | 8.7% | 4.8% | 7.8% | 5.3% | 6.6% | 2.3% | |

表 2 多 TDI-CCD 拼接非均匀性综合校正试验结果

Tab. 2 Experiment result of multi-TDI-CCD non-uniformity correction

| 项目 | 试验结果 |
|----------------|------|
| 原始拼接图像非均匀性 | 8.4% |
| 片内校正后的拼接图像非均匀性 | 6.7% |
| 片间校正后的拼接图像非均匀性 | 2.7% |

5 结 论

本文针对多 TDI-CCD 拼接图像特点,提出了片内与片外综合非均匀性校正方法。采用该方法进行拼接图像校正,可将非均匀性为 8.4% 的拼接相机输出数字图像校正到非均匀性为 2.7% 的指标范围内。由于该算法计算过程简单方便,为通过 FPGA 实现拼接相机输出图像硬件实时校正提供了可能。

参考文献:

[1] 代少升,袁祥辉. 红外图像非均匀性实时校正的新技术. [J]. 光学精密工程, 2004,12(2):201-204. DAI SH SH, YUAN X H. Real-time correction of infrared image nonuniformity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(2):201-204. (in Chinese)

[2] 李云飞,李敏杰,司国良,等. TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理 [J]. 光学精密工程, 2007,15(8):1196-1202.

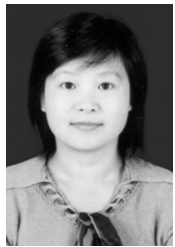
LI Y F, LI M J, SI G L, *et al.*. Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1196-1202. (in Chinese)

[3] 程万胜,赵杰,蔡鹤泉,等. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学精密工程, 2008,16(2):314-318. CHENG W S, ZHAO J, CAI H G, *et al.*. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):314-318. (in Chinese)

[4] 陈迎娟,张之江,张智强. CCD 像素响应不均匀性的

- 校正方法[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(2): 216-220.
- CHEN Y J, ZHANG ZH J, ZHANG ZH Q. Correction of CCD pixel non-uniformity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 216-220. (in Chinese)
- [5] IRANI M, PELEG S. Improving resolution by image registration[J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1991, 53: 231-239.
- [6] 卢蓉, 高昆, 倪国强, 等. 图像融合系统中多分辨实时处理策略的研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(11): 1075-1078.
- LU R, GAO K, NI G Q, *et al.*. Study on multi-resolution real-time processing strategy in image fusion system[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(11): 1075-1078. (in Chinese)
- [7] 郑瑞红, 陈钱. 基于场景的红外图像非均匀校正算法的研究[J]. 光电子技术, 2003, 23(4): 241-244.
- ZHENG R H, CHEN Q. The research of scene-based method on infaded nonuniformity correction [J]. *Optoelectronic Technology*, 2003, 23(4): 241-244. (in Chinese)
- [8] 徐树兴, 王宝光, 郑义忠. 线阵 CCD 平场校正及 FPGA 实现的研究[J]. 宇航计测技术, 2007, 27(6): 34-37.
- XU SH X, WANG B G, ZHENG Y ZH. Study on linear CCD flat field correction and its implementation on FPGA [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007, 27(6): 34-37. (in Chinese)
- [9] 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.
- LIU Y X, RUAN J HAO ZH H. Research on the nonuniformity correction of linear TDI CCD remote camera[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(6): 749-751. (in Chinese)

作者简介:



岳俊华(1970—),女,吉林辽源人,博士研究生,1992年于南京理工大学获得学士学位,2005年于辽宁石油化工大学获得硕士学位,研究方向为数字图像处理、模式识别、CCD在计算机中的应用等。E-mail: yuejunhua@tom.com

导师简介:

郭永飞(1961—),男,山东人,研究员,博士生导师,1990年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电技术应用,CCD在计算机中的应用,嵌入式系统开发等方面的研究。E-mail: guoyongfei@163.com

李岩(1970—),男,吉林舒兰人,博士,硕士研究生导师,1999年,2007年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士和博士学位,主要从事计算机存储技术、图像处理、图像识别等方面的研究。E-mail: liyan2455@sina.com

武学颖(1979—),女,黑龙江肇东人,博士研究生,主要从事空间光通信、光电成像技术等方面的研究。E-mail: wuxueying1979@yahoo.com.cn

司国良(1979—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要从事光电成像技术方面的研究。E-mail: siguol@sina.com