

文章编号: 0253-2239(2010)07-2012-05

# 基于经验模式分解的 CCD 器件自适应 非均匀性校正方法研究

李 静 王军政 汪首坤 沈 伟

(北京理工大学自动化学院复杂系统的智能控制与决策重点实验室, 北京 100081)

**摘要** 针对高精度测试系统中电荷耦合器件(CCD)的非均匀性会给测试结果带来较大误差,根据引起非均匀性的噪声特性,建立了对应的图像模型。根据传统两点线性法的基本思想,提出了一种基于经验模式分解(EMD)的自适应分析方法对非均匀性像素进行校正。该算法以 Hilbert-Huang 变换(HHT)中的滤波器理论为基础,将图像序列在时间域的尺度分解和相应统计量计算,获得用于图像校正的偏置和增益系数。通过实际实验对所提算法进行了验证,结果表明,该算法能够有效地校正像素的非均匀性,提高了测试精度。

**关键词** 图像处理; CCD 器件; 非均匀性校正; 自适应分析; 经验模式分解(EMD)

中图分类号 TN386.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2012

## CCD Nonuniformity Adaptive Correction Method Based on Empirical Mode Decomposition

Li Jing Wang Junzheng Wang Shoukun Shen Wei

(Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision, School of Automation,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** In the high-precision measurement system, the charge coupled device (CCD) nonuniformity will give a greater margin of error to measurement results. According to the characteristic of noise leading to the image pixels nonuniformity, the corresponding image model is established. According to the traditional two-point linear correction method, an adaptive correction method is put forward, in which the Hilbert-Huang (HHT) filter theory is applied. With the scale decomposition of image sequences on the time domain and the corresponding statistics calculation, the offset and gain coefficients in CCD image are obtained. In experiments the high speed area array CCD is adopted to acquire images with the circular facula launched by the laser, and the algorithm is verified by calculating the facula central coordinates of the image. The results show that the algorithm can correct pixel nonuniformity effectively. The algorithm proposed is better than the algorithm for nonuniformity correction using linear model. The experimental result shows the superiority of the algorithm.

**Key words** image processing; CCD device; nonuniformity correction; adaptive analysis; empirical mode decomposition(EMD)

### 1 引 言

电荷耦合器件(CCD)作为一种新型的光电转换器已广泛应用于工业测试等领域。但是由于 CCD 中的暗电流、量子效应、材质结构等局部差异性和各种噪声的存在,各像素对于相同的辐照度产

生的灰度值并不相同,甚至有较大的差异。因此在高精度测试中<sup>[1]</sup>,上述因素会给测试带来较大误差,必须对其进行修正。

目前已有的校正方法主要是针对红外聚焦平面的不均匀性的校正算法,以及微光 CCD 器件图像的

收稿日期: 2009-08-19; 收到修改稿日期: 2009-10-29

基金项目: 北京市产学研科研基金(1010013020105)资助课题。

作者简介: 李 静(1982—),女,博士研究生,主要从事新型检测技术方面的研究。E-mail: bitljing@163.com

导师简介: 王军政(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事新型伺服驱动与检测技术等方面的研究。

E-mail: wangjz@bit.edu.cn

校正算法,其原理是根据输出数据的特性对非均匀性进行校正,主要有采用扩展向量中值滤波<sup>[2]</sup>、卡尔曼滤波算法<sup>[3,5]</sup>的非均匀性校正方法等,此类算法不仅需要参考辐射源,而且难以对探测器响应随时间漂移的影响实施实时的校正;另外还有针对噪声源、CCD 的特性采用两点和多点的非均匀性修正算法<sup>[6]</sup>等。上述方法只能校正特定条件下的像素非均匀性,且动态范围小,当辐照度变化时会引入较大误差。本文根据传统两点线性法的基本思想,提出了一种基于经验模式分解(EMD)的自适应分析方法对非均匀性像素进行校正。该算法以 Hilbert-Huang 变换(HHT)中的滤波器理论为基础,将图像序列在时间域的尺度分解和相应统计量计算,获得在图像校正中起影响的偏置和增益系数,然后对摄像机像素进行非均匀性校正。该算法计算增益和偏置校正参量的数据全部或部分来自于基于场景的估计,采用不同的图形处理技术来实现非均匀性校正,它们不需要参考源,而且不影响系统的正常工作。因此近些年来,这类算法受到了广泛关注<sup>[7~9]</sup>。

## 2 CCD 图像理论分析与研究

一个图像系统在每一个采集点都有对应的像素值  $I(x, y)$ 。因此一个数字的二维图像可以描述为<sup>[10]</sup>

$$D(x, y) = [K_C(x, y)I(x, y) + N_D(x, y) + N_S(x, y) + N_R(x, y)]A + N_Q(x, y), \quad (1)$$

式中  $K_C(x, y)$  为 CCD 的非均匀性常数,  $A$  为输出放大器和摄像机电路的综合增益,  $N_D(x, y)$  为暗电流。暗电流的大小与光照强度无关,而与 CCD 像素的本征材料、曝光时间和温度等有关,在 CCD 曝光时间很小或温度较低时可以忽略。  $N_S(x, y)$  为零均值泊松散粒噪声变量,其取决于  $K_C(x, y)I(x, y)$  和  $N_D(x, y)$ 。散粒噪声是指 CCD 在光注入、电注入或热作用下所产生的信号电荷包的电子数目的不确定

性,也就是电子数目围绕平均值上下波动所形成的噪声。  $N_R(x, y)$  为读出噪声,即读出电容器和片上放大器的噪声。  $N_Q(x, y)$  为量化噪声,是振幅量化过程中固有的噪声,发生在模数转换过程中。该噪声具有加性,高斯特点,并且服从均匀概率分布,在  $[-q/2, q/2]$  范围内它的方差为  $q^2/12$ ,其中  $q$  为量化能级。

针对此图像模型,为了提高摄像机输出像素的准确性,减小各种噪声的影响,特提出以下利用场景的 CCD 自适应非均匀性校正方法。

## 3 基于 EMD 的非均匀性校正算法

CCD 每个像素的响应在工作范围内是线性的,在理想条件下 CCD 像感器固定位置像素的增益和偏移量是一致的,该线性校正算法是基于增益和偏移参数实现的<sup>[11~13]</sup>。校正的目的是使每个像感器在相同的条件下有相同的输出灰度值。可通过下式来校正:

$$D_C(x, y) = g(x, y)D(x, y) + o(x, y), \quad (2)$$

$$(x = 1, \dots, m; y = 1, \dots, n),$$

式中  $D(x, y)$  是未进行校正的输出灰度值,  $D_C(x, y)$  为校正后图像灰度值,  $g(x, y)$  和  $o(x, y)$  分别为增益和偏移校正参数,  $m$  对应于 CCD 的行像素数,  $n$  对应于 CCD 的列像素数。

HHT 算法是由 Huang 等<sup>[14]</sup>1998 年提出的一种新的非线性、非平稳的信号处理方法,其核心是经验模式分解,该方法基于信号的时间尺度将信号分解为若干个固有模式函数(IMF)之和,分解结果唯一且得到的各 IMF 之间具有正交性。各 IMF 分量突出了信号的局部特征,包含信号从高到低不同频段的成分,对各分量进行分析可以更加准确、有效地把握信号的特征信息。

假设  $D(x, y)$  是大小为  $m \times n$  的图像,则其二维 EMD 分解过程如图 1 所示。

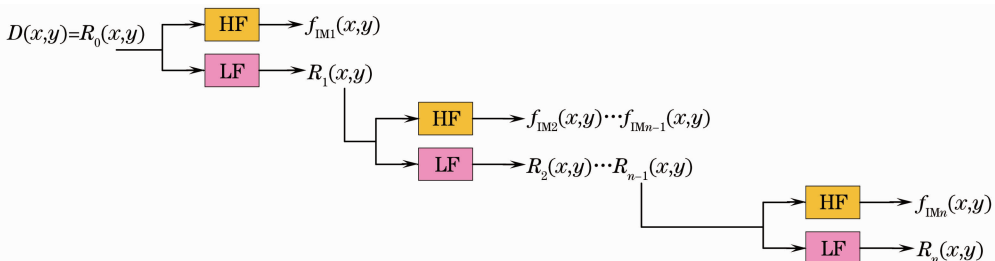


图 1 经验模式分解(EMD)过程

Fig. 1 EMD process

在筛分过程中采用二维 EMD 方法提取图像的二维 IMF 分量。其实现过程如下<sup>[15]</sup>：

1) 对所给图像  $D(x, y)$  求取曲面局部极值点, 包括所有局部极大值和极小值;

2) 求取均值包络曲面。极值点找出来之后, 要对各极大值点和各极小值点分别进行曲面拟合, 经插值后得到极大值点曲面包络  $E_{\max}$  和极小值点曲面包络  $E_{\min}$ , 将两曲面数据求平均得到均值包络曲面数据  $E_{\text{mean}}$ ;

3) 用原始曲面减去均值包络曲面  $S_D$ ;

4) 计算终止条件:

$$S_D = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} \frac{[D_{k-1}(x, y) - D_k(x, y)]^2}{D_{k-1}(x, y)^2}.$$

重复步骤 1)~3), 直到满足给定的终止条件, 一般当  $0.2 < S_D < 0.3$  时筛分过程结束, 即得到第一层二维固有模式函数  $f_{\text{IM}1}$ , 用原图像减去第一层模式函数得到第一层剩余量  $R_1(x, y)$ 。对剩余量重复步骤 1)~4), 依次得到图像的  $n$  层固有模式函数和第  $n$  层剩余量。

因此每幅图像  $f(x, y)$  均可分解为

$$D(x, y) = \sum_{k=1}^l f_{\text{IM}k}(x, y) + R_l(x, y), \quad (3)$$

式中  $f_{\text{IM}k}(x, y)$  为 IMF 分量,  $R_l(x, y)$  为剩余量。

利用基于场景校正算法的理论, 在实际应用中选择合适的分解尺度  $l$ , 计算  $R_l(x, y)$  的一阶统计

量, 即为该探测器单元偏置校正系数

$$o(x, y) = E[R_l(x, y)]. \quad (4)$$

而该探测器单元的增益校正系数可利用某一分解尺度下的  $f_{\text{IM}k}(x, y)$  ( $k = 1, 2, \dots, l$ ) 的二阶统计量经归一化求得:

$$g(x, y) = \left\{ \frac{\text{var}[f_{\text{IM}k}(x, y)]}{\sum_x \sum_y f_{\text{IM}k}(x, y)} \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

然后利用(1)式可对 CCD 的像素进行自适应非均匀性校正。

## 4 实验结果及分析

将非均匀性校正方法分别应用到两个基于 CCD 的高精度测试系统中。一个是火炮火控动态稳像精度测试系统, 其结构原理如图 2 所示, 由 CCD 采集到的图像为十字形光斑图像[如图 4(a)所示]。该系统设计了一套利用图像检测技术的瞄准镜稳像精度测试装置, 将测试靶面及光学系统集成在一个大口径平行光管内, 减小了检测设备的体积, 采用六自由度运动模拟器对安装在其上的稳像仪施加扰动量, 模拟行进间的运行状况。摄像机安装在稳像瞄准镜目镜后方, 以摄取瞄准镜视场中心的图像, 实现了一种精度高、全自动的稳像设备动态稳像精度测试方法。

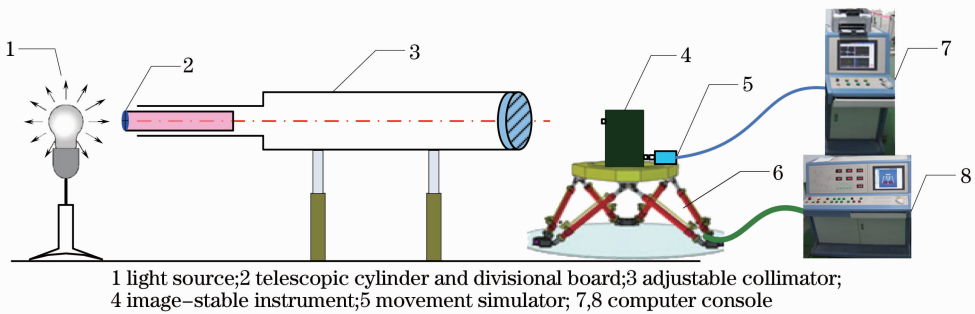


图 2 高精度火控动态稳像精度测试系统示意图

Fig. 2 Sketch map of high-precision dynamic image stabilization measurement system

另一个是火炮动态稳定精度测试系统, 其原理如图 3 所示, 采集的图像为椭圆形光斑图像如图 4(b)所示由圆圈标示出。30 mW 激光器固定在被测物体上, 发射的激光束在靶幕上形成椭圆形光斑, 被测物体作微小平移运动或旋转运动时, 无法直接测量, 因此根据靶幕上光斑对应的移动量测得, 由高速面阵 CCD 实时采集靶幕图像, 并通过千兆以太网输入到测控计算机内, 实时处理得到光斑的实际偏移。

由于上述两个测试系统均为高精度的测试系

统, 因此由 CCD 采集的图像处理后得到的目标位置直接影响系统的测试精度, 通过实际试验表明, 在相同的条件下连续采集图像, 得到的图像目标的位置并不相同, 甚至相差较大。考虑到摄像机自身存在非均匀性, 因此通过本文方法对上述两个高精度测试系统中的 CCD 进行自适应的非均匀性校正。

在相同的采集条件下, 分别对图 4 所示图像的工作条件, 各连续采集 10 幅图像, 通过相应的图像处理算法得到的图像目标位置分别如表 1 和表 2 所示。

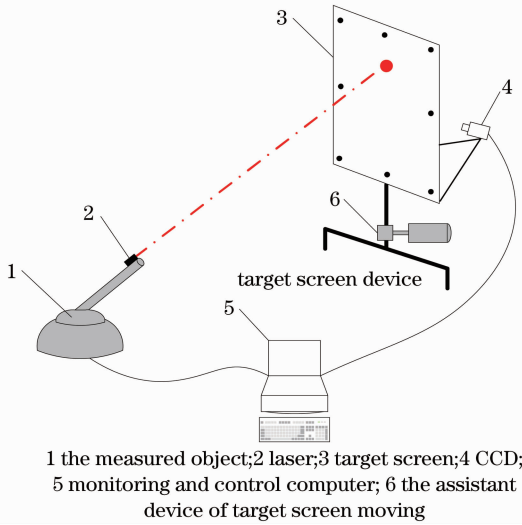


图 3 基于 CCD 的高精度火炮动态稳定精度测试系统示意图

Fig. 3 Ketch map of high-precision dynamic stabilization measurement system based on CCD

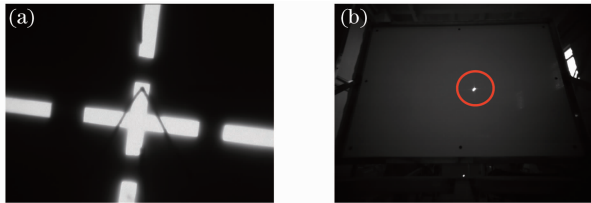


图 4 CCD 采集的目标图像。(a) 十字光斑图像；(b) 椭圆形激光光斑图像

Fig. 4 Object image acquired by CCD. (a) the cross image; (b) the ellipse image of laser spot

表 1 校正前十字形光斑中心坐标

Table 1 Central coordinates of the cross facula before nonuniformity correction

Number	X	Y
1	321.501	293.109
2	321.753	293.725
3	321.831	293.311
4	322.031	293.532
5	321.723	294.002
6	320.821	293.421
7	322.014	293.985
8	321.124	292.562
9	322.452	293.120
10	320.922	293.056

非均匀性校正前 10 幅图像的十字形光斑中心坐标平均值为 (321.617, 293.382), 其中 X 坐标偏移最大值为 0.835 pixel, Y 坐标偏移最大值为 0.821 pixel。

表 2 校正前椭圆形光斑中心坐标

Table 2 Central coordinates of the ellipse facula before nonuniformity correction

Number	X	Y
1	536.611	345.119
2	536.893	345.605
3	536.825	345.402
4	537.001	345.522
5	536.693	345.215
6	537.223	346.007
7	537.114	345.841
8	536.134	344.862
9	536.642	345.204
10	536.622	345.062

非均匀性校正前 10 幅图像的椭圆形光斑中心坐标平均值为 (536.776, 345.384), 其中 X 坐标偏移最大值为 0.642 pixel, Y 坐标偏移最大值为 0.623 pixel。

由表 1 和表 2 可看出, 在噪声的干扰下每幅图像光斑的中心位置跳变较大, 光斑中心跳变微小量即直接影响系统的测试精度。

相同的工况条件下, 再次分别连续采集 10 幅图像, 采用 EMD 校正算法对图像进行非均匀性校正后对应光斑中心坐标分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 校正后十字形光斑中心坐标

Table 3 Central coordinates of the cross facula before nonuniformity correction

Number	X	Y
1	321.561	293.307
2	321.653	293.415
3	321.512	293.311
4	321.355	293.302
5	321.623	293.411
6	321.521	293.282
7	321.474	293.385
8	321.524	293.362
9	321.552	293.312
10	321.602	293.406

非均匀性校正后 10 幅图像的十字形光斑中心坐标平均值为 (321.538, 293.349), 其中 X 坐标偏移最大值为 0.0643 pixel, Y 坐标偏移最大值为 0.0673 pixel。

非均匀性校正后 10 幅图像的椭圆形光斑中心坐标平均值为 (536.689, 345.348), 其中 X 坐标偏移最大值为 0.051 pixel, Y 坐标偏移最大值为 0.063 pixel。

由校正前后光斑的中心坐标值可看出, 采用本

文方法对像素进行非均匀性校正后,光斑的中心位置坐标跳变明显减小,坐标值基本稳定,直接提高了测试精度。

表 4 校正后椭圆形光斑中心坐标

Table 4 Central coordinates of the ellipse facula after nonuniformity correction

Number	X	Y
1	536.745	345.359
2	536.685	345.322
3	536.732	345.285
4	536.736	345.389
5	536.683	345.344
6	536.647	345.406
7	536.655	345.342
8	536.638	345.375
9	536.644	345.311
10	536.722	345.346

## 5 结 论

根据传统两点线性法的基本思想,提出了一种基于二维经验模式分解的自适应分析方法对非均匀性像素进行校正。该算法将图像序列在时间域的尺度分解和相应统计量计算,获得用于图像校正的偏置和增益系数实现非均匀性校正,不需要参考源。分别在两个基于 CCD 的高精度测试系统中对所提算法进行了验证,结果表明该算法能够有效地校正像素的非均匀性,提高了测试精度。

## 参 考 文 献

- 1 Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Anti-noise and precise circle target center location method of CCD laser autocollimator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1609~1614  
敖磊,谭久彬,崔继文等. 激光 CCD 自准直仪圆目标中心抗噪声精确定位方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1609~1614
- 2 Wei Pei, Yongying Zhu, Chong Liu *et al.*. Non-uniformity correction for SLM microscopic images [J]. *Image and Vision Computing*, 2009, **27**(6): 782~789

- 3 Sergio N. Torresa, Majeed M. Hayat, Ernest E. Armstrong *et al.*. Kalman-filtering approach for non-uniformity correction in focal-plane array sensors[C]. *SPIE*, 2003, **4030**: 196~205
- 4 Sergio K. Sobarzo, Sergio N. Torres. Real-Time Kalman Filtering for Nonuniformity Correction on Infrared Image Sequences: Performance and Analysis [C]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, **3773**: 752~761
- 5 Liu Yongjin, Zhu Hong, Zhao Yigong. Nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays based on steady state kalman filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1697~1702  
刘永进,朱红,赵亦工. 基于稳态卡尔曼滤波的红外焦平面阵列非均匀校正算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1697~1702
- 6 Liu Yaxia, Hao Zhihang. Research on the nonuniformity correction of linear TDI CCD remote camera [C]. *SPIE*, 2005, **5633**: 527~535
- 7 Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian. Nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1617~1620  
秦翰林,周慧鑫,刘上乾. 小波变换的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1617~1620
- 8 Huixin Zhou, Shangqian Liu, Rui Lai *et al.*. Solution for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(15): 2928~2932
- 9 Jorge E. Pezoa, Sergio N. Torres. Multi-model Adaptive Estimation for Nonuniformity Correction of Infrared Image Sequences [C]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, **3212**: 413~420
- 10 Glenn E. Healey, Raghava Kondepudy. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation [J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 1994, **16**(3): 267~276
- 11 Abraham Friedenberg, Isaac Goldblatt. Nonuniformity two-point linear correction errors in infrared focal plane arrays [J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(4): 1251~1253
- 12 Liu Yaxia, Hao Zhihang. Research on the radiometric calibration of TDI CCD remote camera [C]. *SPIE*, 2005, **6033**: 267~276
- 13 Marta de Lasarte, Jaume Pujol, Montserrat Arjona *et al.*. Optimized algorithm for the spatial nonuniformity correction of an imaging system based on a charge-coupled device color camera [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(2): 167~174
- 14 N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1998, **454**(1971): 903~995
- 15 Zhongxuan Liu, Silong Peng. Boundary processing of bidimensional EMD using texture synthesis [J]. *IEEE Signal Proc. Lett.*, 2005, **12**(1): 33~36