

光纤耦合 CCD 相机的平场校正方法研究*

江孝国 祁双喜 王婉丽 王伟

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 对于光纤锥耦合的 CCD 相机中存在的响应非均匀性问题进行了阐述, 针对这种类型的系统的平场校正方法进行了仔细的研究, 分析了 CCD 相机输出信号的构成情况, 并利用这些方法对实际存在较严重的非均匀问题的图像进行处理, 获得了很好的结果, 达到了图像精密处理的效果。

关键词 光纤锥; CCD 相机; 响应非均匀性; 固定花样噪声; 平场校正

中图分类号 O439; TN386.5 **文献标识码** A

0 引言

CCD 相机作为新型图像捕获设备, 已经广泛地应用于各行业。但是, 实际的 CCD 相机在光敏元的响应、噪声水平、量子效率等方面均存在差异, 导致在相同的条件下各个光敏元产生不同的光电子数, 所对应的输出信号也不一致的现象, 这种现象称为响应的非均匀性 (Photo-Response Non-Uniformity 简称 PRNU^[1])。对于阵列探测器而言, 响应非均匀性的现象总是存在的; 如果系统中采用了光纤面板或光纤锥、镜头等耦合器件, 则系统表现出来的响应非均匀性更严重, 例如镜头的渐晕现象将导致均匀光场成在 CCD 光敏面上的像不是平场而是一个具有与渐晕分布相似的光场; 如果耦合器件是光纤面板, 则由于各光纤透过率的差异, 也会导致入射到 CCD 光敏面上的光场存在差异, 且光场的分布明显与光纤透过率的分布一致; 而 CCD 本身也会因制造上的原因使得各光敏元的响应率、暗电流的水平不一样, 最后造成输出图像中各像元存在差异。综上所述, 响应的非均匀性可以看作是成像系统像面上的像元间的响应失配引起的。平场校正就是要消除上述这样的一些差别, 使输出图像为所拍摄的真实图像。

本文根据系统的组成分析了系统输出信号的成份及其响应规律, 说明了只有在响应具有线性关系的情况下才能使用平场校正的方法达到图像校正及精密处理的目的; 并以该系统为例阐述了具体的平场校正方法, 给出了校正前后的图像。

1 光纤(锥)耦合的 CCD 相机结构

图1是某种 X 射线 CCD 相机的光学传输结构。其中 X 光转换屏是光纤结构的转换器, 材料为发光

玻璃, 厚度 5 mm, X 光在其体内被吸收并被转换为可见光, 沿纤维方向传播到光纤锥的入射端面; 利用光纤锥较高的能量耦合效率将可见光图像高效地传输到 CCD 光敏面上, 并达到图像面大小的变换作用, 获得分辨率未受严重影响 (视光纤的直径) 的图像, 最后由系统输出一幅已数值化的图像。

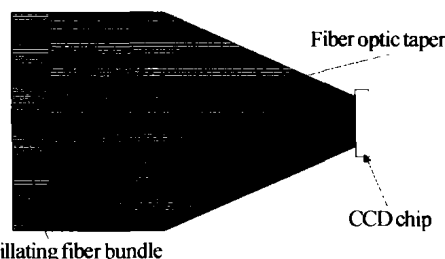


图1 光纤耦合的 X 射线 CCD 相机典型结构
Fig. 1 Typical structure of fiber-coupled X-ray CCD camera

2 图像传递中的响应关系

2.1 X 光转换器

在 X 光转换器中, 材料对 X 光的响应是线性的, 与材料种类、厚度、光纤端面积、X 光光子能量有关, 可以简单地表示为^[2]

$$S_x(x, y) = \eta_x(x, y) X_i(x, y) \quad (1)$$

式中 $S_x(x, y)$ 为 (x, y) 处的单根发光光纤的输出光信号, 单位可设为光子数; $\eta_x(x, y)$ 为 (x, y) 处单根发光光纤对 X 光的响应效率, 已经综合了光纤的端面积、长度及 X 光能的影响, 单位为光子数 $(C/Kg)^{-1}$; $X_i(x, y)$ 为 (x, y) 处入射 X 光的照射量, 单位为 C/Kg 。 $\eta_x(x, y)$ 明显地由于发光材料及光纤端面积的差异而不同, 并且由于光纤排列的原因, 导致 X 光转换器内 $\eta_x(x, y)$ 并不一致, 存在一定的分布, 甚至相邻两根发光光纤的 $\eta_x(x, y)$ 值可以相差很大。

2.2 耦合光纤锥

该耦合光纤锥传输可见光图像, 可以用传输效率、透过率或耦合效率来描述其传输光能的性能^[3], 在此以耦合效率 η_c 来表示; 同样地, 相邻两根传输光纤的耦合效率可以完全不同。对于一幅图像

* 国防科技基础研究基金资助项目
Tel: 0816-2484178 Email: j_xg_caep@sohu.com
收稿日期: 2003-09-19

的传输而言,光纤锥的输出可以描述为

$$S_o(x, y) = \eta_o(x, y) S'_i(x, y) \quad (2)$$

式中 $S_o(x, y)$ 为光纤锥 (x, y) 处光纤的输出光信号, 单位为光子数; $\eta_o(x, y)$ 为光纤锥 (x, y) 处光纤的耦合效率; $S'_i(x, y)$ 为光纤锥 (x, y) 处入射的光信号, 单位为光子数, 它与 X 光转换器 (x, y) 处的发光光纤输出光信号的关系为

$$S'_i(x, y) = \eta_{x-o}(x, y) S_x(x, y) \quad (3)$$

式中 $\eta_{x-o}(x, y)$ 为 X 光转换器与光纤锥间的耦合效率, 与光纤端面的对齐、端面间隙、折射率匹配的程度有关.

2.3 CCD 相机响应

对于 CCD 而言, 它对照射到其光敏面上的可见光的响应是线性关系^[4], 可以表示为

$$P_{\text{CCD}}(x, y) = \eta_{\text{QE}}(x, y) S'_o(x, y) \quad (4)$$

式中 $P_{\text{CCD}}(x, y)$ 为 CCD 对输入光信号产生的光电子数, $\eta_{\text{QE}}(x, y)$ 为 CCD 响应的量子效率, 与入射光波长有关, $S'_o(x, y)$ 为入射可见光信号, 它与光纤锥输出信号间的关系为

$$S'_o(x, y) = \eta_{o-\text{CCD}}(x, y) S_o(x, y) \quad (5)$$

式中 $\eta_{o-\text{CCD}}(x, y)$ 为光纤锥与 CCD 间的耦合效率, 与端面的对齐、端面间隙、折射率匹配的程度有关.

对于 CCD 相机的灰度输出图像信号 $G_{\text{CCD}}(x, y)$ 而言, 可表示为

$$G_{\text{CCD}}(x, y) = K(P_{\text{CCD}}(x, y) + i(x, y)t) + G_{\text{off}} \quad (7)$$

式中 K 为 CCD 相机中的模数转换关系, 可以看作常数, $i(x, y)$ 为 CCD 在相应工作条件下的暗电流, 以像元考虑的话, 单位可以用电子数/秒·像元来表示, t 为 CCD 一帧的时间, G_{off} 为 CCD 相机的偏置, 是一常数. 综合上述各式, CCD 相机输出的灰度图像可表示为

$$G_{\text{CCD}}(x, y) = K\eta_{\text{QE}}\eta_{o-\text{CCD}}\eta_o\eta_{x-o}\eta_x X_i + K(x, y)t + G_{\text{off}} = \eta(x, y) X_i(x, y) + Ki(x, y)t + G_{\text{off}} \quad (8)$$

由于系统固定不变, 式(8)中右边第一项的系数可以用一个与 (x, y) 相关的单一系数 $\eta(x, y)$ 表示, 该系数实际上就代表了每个像元的响应特性. 式(8)是一个准确描述 CCD 光敏面响应分布的表达式. 如前所述, 在使用了发光光纤及光纤锥作耦合后, 系统光敏面各像元间的响应就可能存在较大的差异了.

3 平场校正方法

在式(8)中的 $Ki(x, y)t$ 项是与暗电流相关的, 而 CCD 的暗电流与 CCD 光敏元本身的性能有关, 具有位置固定的特性, 称之为 CCD 的固定花样噪声 (Fixed Pattern Noise, 简称 FPN)^[1,5], 这是一种基线

噪声, 可以通过减法消除, 而减法同时也可以消除偏置项 G_{off} . 因此, 作平场校正的第一步需要获得系统的暗本底图像 $G_B(x, y)$, 且所选择的曝光时间要与被用来校正的图像 $G(x, y)$ 的曝光时间相同, 暗本底图像 $G_B(x, y)$ 可表示为

$$G_B(x, y) = Ki(x, y)t + G_{\text{off}} \quad (9)$$

第二步也是很关键的一步: 通过对均匀光场的成像获得一幅要用于平场校正的参考图像 $G_R(x, y)$, 该图像原则上要求用均匀光场进行照明且时间与暗本底图像 $G_B(x, y)$ 相同, 参考图像 $G_R(x, y)$ 可表示为

$$G_R(x, y) = \eta(x, y) X_0 + Ki(x, y)t + G_{\text{off}} \quad (10)$$

由于采用了平场光照明, X_0 完全相等, 如果不是各像素响应率 $\eta(x, y)$ 不同, 则各像素输出灰度的 G_R 也应该相等, 但实际情况中不可能各像素的 $\eta(x, y)$ 都相等, 故 G_R 不全相同; G_R 的不相同正好反映出各像素响应率的不同, 如果能对其进行标定就可以确定各像素的响应率; 如果能精确测量入射光场的照射量 X_0 , 则也可以将 $\eta(x, y)$ 的绝对值标定出来, 最终也能对图像进行校正, 但实际上这样做存在较大的困难, 所以采用了相对标定的方法——平场校正法, 这种方法的优点在于无需准确知道入射光场的照射量大小, 但要求光场均匀且光照水平尽量高, 以减小信号涨落引起的问题; 用式(10)减式(9)可得

$$\eta(x, y) = [G_R(x, y) - G_B(x, y)] / X_0 \quad (11)$$

这样就获得了对应于每一个像素响应率的数据, 相当于对 CCD 所有的像素建立了一个查找表, 就目前而言还不必知道 X_0 的值.

第三步就可以进行图像的校正了. 按上述要求, 被用于校正的图像 $G(x, y)$ 表示为

$$G(x, y) = \eta(x, y) X(x, y) + Ki(x, y)t + G_{\text{off}} \quad (12)$$

明显地, 当系统是线性响应的时候 ($\eta(x, y)$ 是一常数), 由式(9)、(10)、(11)可得

$$X(x, y) / X_0 = [G(x, y) - G_B(x, y)] / [G_R(x, y) - G_B(x, y)] \quad (13)$$

这样就获得了经过平场校正后的图像, 它是一幅相对值图像, 但并不对图像处理产生不良影响. 当系统的偏置和暗电流都很小时 (即 $G_B(x, y)$ 远小于 $G_R(x, y)$ 、 $G(x, y)$), 在要求不是很高的情况下, 可以直接用图像数据点对点地除以参考图像数据也能得到一定效果的校正; 如果系统的偏置和暗电流都较大时, 在校正时就必须考虑系统的偏置和暗电流的影响, 在精密的图像处理中, 还是应该严格地按照上述步骤进行.

4 实验结果

针对实际的系统按照上述方法进行了图像校正.

通过调节软 X 光机与 X 射线 CCD 相机的距离,在相机处的小照射场内可以产生比较均匀的入射光场.图 2 就是获得的用于平场校正的参考 X 光图像及中间的一条剖面,可以看见像元响应的严重不均匀性及相对固定的位置关系;图 3 是用铜和铁做成的台阶原始 X 光图像及其边界的检测图(用 sobel 算子),该图像的噪声明显比较大,并且像元响应的严重不均匀性已经显著地影响了图像处理的效果,该图像无论怎么处理都无法获得所需的详细信息,并且一些相对明显的边界处理效果也不好;而经过平场校正后的图像如图 4 所示,相对于未作平场校正的原始图像而言要清晰得多,噪声也要小很多,很多细节都能在灰度图像中直接看出,经过边界处理和伪彩显示后则可清晰地看到小于 0.1 mm 的细缝.

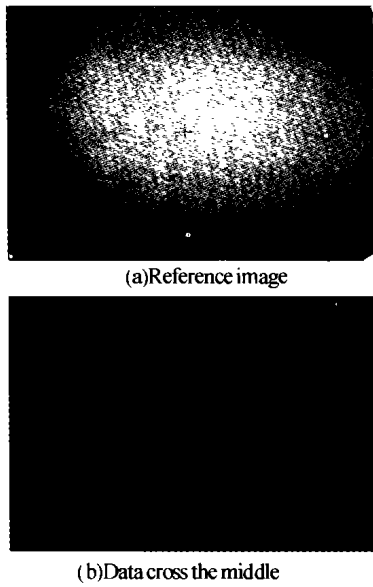


图 2 用于校正的参考图像及中心区域剖面图
Fig. 2 Image for correction and its data cross the middle

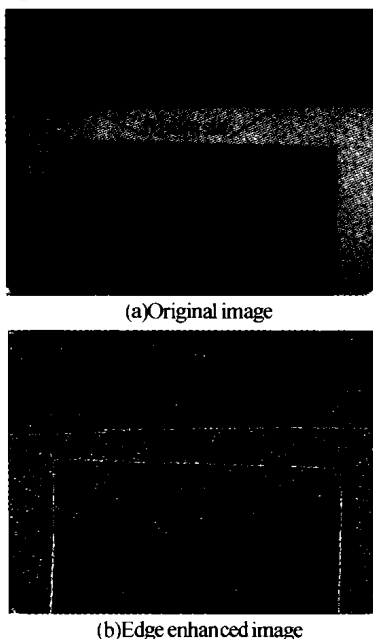


图 3 原始图像及边界处理图像
Fig. 3 Original image and its edge enhanced image

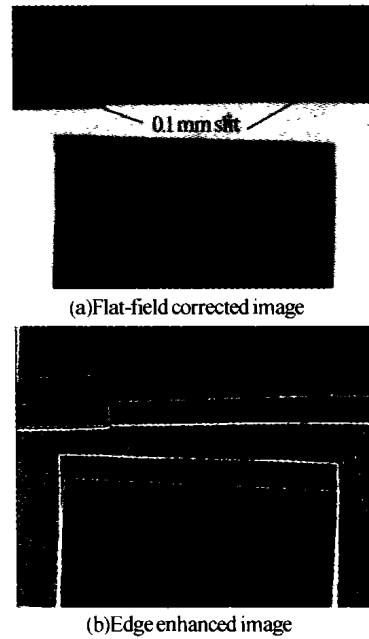


图 4 平场校正图像边界处理图像
Fig. 4 Flat-field corrected image and its edge enhanced image
本系统中引起响应非均匀性分布的主要环节是 X 光转换器和光纤锥,而 CCD 像素本身的响应非均匀性并不很严重.

5 结论

由光纤而板或光纤锥器件与 CCD 构成高效率探测系统时,由于各光纤的性能存在较大差异或响应的不一致,使输出信号也出现较大的差异,构成对图像的严重不良影响,需作平场校正.同时,能够进行图像平场校正的系统响应必须是线性响应,这是前提条件.当这种响应不一致的分布是固定的时候,就可以采用平场校正的方法来得到响应一致的校正图像;图像的平场校正是在作精密图像处理时必须进行的一项工作,是消除图像各点响应不一致的较好方法.

参考文献

- 1 Fox E C, Agwani S, Dykaar D R, et al. A high speed linear CCD sensor with pinned photodiode photosite for low lag and low noise imaging. *SPIE*, 1998, **3301**: 17 ~ 26
- 2 江孝国, 谭肇, 王伟, 等. CsI: Tl 转换屏的发光灵敏度研究. *光子学报*, 2002, **31** (Z2): 321 ~ 326
Jiang X G, Tan Z, Wang W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31** (Z2): 321 ~ 326
- 3 安连生, 李林, 李全臣. *应用光学*. 北京: 北京理工大学出版社, 2002. 216 ~ 225
An L S, Li L, Li Q C. *Applied optics*. Beijing: The press of Beijing institute of technology, 2002. 216 ~ 225
- 4 杨桦, 焦文春, 朱永红, 等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数. *光学学报*, 2002, **22** (3): 313 ~ 316
Yang H, Jiao Wc, Zhu Yh, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 313 ~ 316

5 Gamal E I, Abbas, Fowler Boyd, *et al.* Modeling and estimation of FPN components in CMOS image sensors.

SPIE,1998,**3301**:168 ~ 177

Flat-correction Method for Fiber Optic Taper Coupled CCD Camera

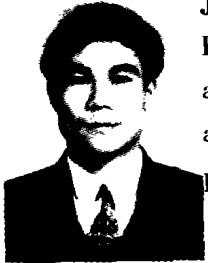
Jiang Xiaoguo, Qi Shuangxi, Wang Wanli, Wang Wei

Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900

Received date:2003-09-19

Abstract The Photo-Response Non-Uniformity (PRNU) in the fiber optic taper coupled CCD camera is discussed. The flat-correction method especially for the system mentioned above is a very useful method to get a better image. The method is deduced in detail by analyzing the components in the signal output with the CCD camera. Some images with very big PRNU problem are processed by the flat-correction method and the good result can be obtained. The flat-correction of image output by the fiber optic taper coupled CCD camera is necessary. One example is given to show the effect of the flat-correction method.

Keywords Fiber optic taper; CCD; Photo-response non-uniformity; Fixed pattern noise; Flat-field correction



Jiang Xiaoguo graduated from photoelectron technology specialty of Department of Applied Physics of Science and Technology University of National Defence in 1990. He is studying on the application of photoelectron technology in the Institute of Fluid Physics and is working on the application of CCD, the digital image processing and the study on low noise signal circuits. He has published over ten articles in the domestic core magazines.