

doi:10.3788/gzxb20154405.0504001

可微调非粘结光锥阵列耦合数字 X 射线探测器

赵志刚, 王茹, 雷耀虎, 郭金川, 杨勤劳, 牛憨笨

(深圳大学 光电工程学院 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 深圳 518060)

摘 要:光锥阵列耦合数字 X 射线探测器是获得大面积高分辨率数字 X 射线成像的重要途径,但目前通常采用粘结固定的方式实现光锥阵列各小端面与对应图像传感器芯片之间的耦合.为克服粘结耦合方式的不足,设计并实现了一种可微调的非粘结 2×2 光锥阵列耦合数字 X 射线探测器.该方案能够在调节空间受光锥阵列结构和硬件电路板尺寸限制,特别是竖直方向板间距离仅 40mm 的情况下,通过独特设计的水平和竖直调节机构在同一个调节层上对四块数据采集板分别进行多维度调节.利用四块数据采集板与数据传输板相互分立的特点,设计了基于 ARM+4 FPGA 的嵌入式以太网多 CMOS 芯片传输数据采集系统,所实现的 X 射线探测器成像面积达 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$,能够完成可微调的非粘结耦合和多 CMOS 芯片的图像数据采集.

关键词:X 射线探测器;光锥阵列;耦合;X 射线成像;调节机构;数据采集;数据传输

中图分类号:TH74; TH122

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)05-0504001-6

Fine Adjustable Non-glued Fiber Optic Taper Array Coupled Digital X-ray Detector

ZHAO Zhi-gang, WANG Ru, LEI Yao-hu, GUO Jin-chuan, YANG Qin-lao, NIU Han-ben
(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and
Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering,
Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Fiber Optic Taper(FOT) array coupled digital X-ray detector is an efficient way for large-area high-resolution X-ray imaging applications, but the coupling method between the small ends of FOT array and the corresponding image sensors is commonly tightly glued coupling at present. To avoid the disadvantages in the conventional glued coupling method, a fine adjustable non-glued 2×2 FOT array coupled digital X-ray detector was designed and implemented. The proposed X-ray detector scheme can realize multi-dimensional adjustment of the four data acquisition boards on the same adjusting layer through the novel horizontal and vertical adjusting mechanisms, with the restriction of the limited adjusting space formed by the structure of the FOT array and the sizes of the printed circuit boards, and especially under the condition of the distance between the boards was only 40 mm in the vertical direction. According to the fact that the four data acquisition boards and the data transmission board are separated, an embedded Ethernet data acquisition system for multiple CMOS image sensors based on one ARM chip and four FPGA chips was implemented. Tested results showed that the implemented X-ray detector with the imaging area of as large as $100\text{mm} \times 100\text{mm}$, can realize fine adjustable non-glued coupling and data acquisition of multiple CMOS image sensors, which could be a new way for multipurpose use in large-area high-resolution digital X-ray imaging applications for scientific researches.

Key words: X-ray detector; Fiber optic taper array; Coupling; X-ray imaging; Adjusting mechanism; Data acquisition; Data transmission

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61227802, 11074172)、国家重点基础研究发展计划(No. 2012CB825804)、中国博士后科学基金(Nos. 2012M511835, 2013T60813)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20124408120001)资助

第一作者:赵志刚(1977-),男,讲师,博士,主要研究方向为数字化 X 射线成像. Email: zhaozhigang127@163.com

通讯作者:牛憨笨(1940-),男,研究员,主要研究方向为变像管超快诊断、X 射线相衬成像. Email: hbniu@szu.edu.cn

收稿日期:2014-11-12; **录用日期:**2015-01-22

<http://www.photon.ac.cn>

OCIS Codes: 040.7480; 040.6070; 040.1880; 110.7440; 170.7440

0 引言

光锥阵列耦合数字 X 射线探测器采用多个光锥的大端以阵列形式拼接形成的光锥阵列作为耦合元件,实现 X 射线转换屏与 CCD/CMOS 图像传感器芯片(CMOS 芯片)之间的光传导.与单光锥耦合探测器相比,光锥阵列耦合探测器的成像面积成倍增加,同时能保留光锥耦合相比传统透镜耦合在耦合效率高、体积小、分辨率高等方面的优势,是获得大面积高分辨率数字 X 射线成像的重要途径^[1-2].国际上已有多家研究机构开展了光锥阵列耦合数字 X 射线探测器相关的研究,涉及到大分子晶体衍射和高分辨率医学影像等多个应用领域^[3-6].

目前,单光锥耦合或光锥阵列耦合数字 X 射线探测器普遍采用光敏胶等粘结剂,以粘结固定的方式实现光锥小端面与对应 CCD/CMOS 芯片感光面的耦合^[7-11].但是在光锥阵列耦合探测器中粘结耦合后,任何一个 CCD/CMOS 芯片的损坏都可能导致光锥阵列和其它芯片一起报废.另外,耦合工艺会形成一些瑕疵,加上各 CCD/CMOS 芯片之间电气特性不一致,一旦粘结耦合后这些瑕疵和不一致性都将被固化,无法根据实际情况调整.在光锥阵列耦合探测器中,光锥阵列为主要成本之一.受工艺水平限制,从事相关研究需从国外进口,不但价格非常昂贵,还时常会到一些限制.科研中往往需要重复利用光锥阵列配合不同的图像传感器芯片以满足高速、高分辨率、高灵敏度等成像需求.因此,开展可微调的非粘结耦合数字 X 射线探测器研究有重要的现实意义.

与单光锥耦合时 CCD/CMOS 芯片的四个侧边在空间上处于不受约束的自由状态不同,多光锥耦合时各芯片相邻侧边之间的距离有限,难以设置耦合机构,这对非粘结耦合的机械结构和硬件电路设计带来新的挑战.

为满足大面积高分辨率 X 射线相衬成像系统的需求,本文采用四颗 CMOS 芯片,设计并实现了一种针对大面积硅深孔阵列像素化 X 射线转换屏的可微调非粘结 2×2 光锥阵列耦合数字 X 射线探测器方案.硅深孔阵列像素化 X 射线转换屏具有极高的分辨率,但其出光效率相对较低^[12-13],适用于光锥阵列的耦合.

1 探测器总体结构设计

为使各 CMOS 芯片能够精密地与对应光锥小端面进行耦合,设计了四块相互独立的以 FPGA 为核心的数据采集板(简称 FPGA 板),四颗 CMOS 芯片分别搭载在一块电路板的一角.一块以 ARM 为核心的数据传输电路板(简称 ARM 板)用于实现四块采集板的数

据及命令传输.各 FPGA 板与 ARM 板之间以柔性电路板(FPC)相连.这种设计方案为各 FPGA 板分别带动所搭载的 CMOS 芯片与对应光锥小端面进行精密耦合创造了条件.图 1 是所设计的 2×2 光锥阵列耦合数字 X 射线探测器在耦合前的结构示意图.本文使用三维图像绘制软件 Solidworks 完成了所有机械图的设计.

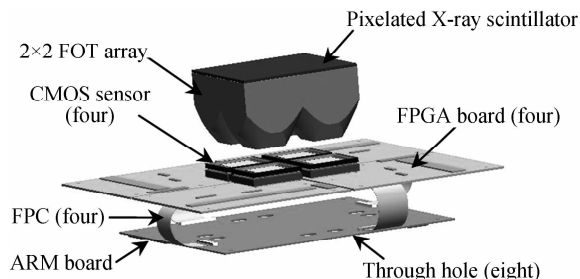


图 1 2×2 光锥阵列耦合数字 X 射线探测器的结构示意图(耦合前)

Fig. 1 Scheme of the 2×2 FOT array coupled digital X-ray detector (before coupling)

所用的光锥阵列来自肖特公司(Schott),大端面尺寸为 100mm×100mm,小端面尺寸约为 50mm×50mm. CMOS 芯片为赛普拉斯公司(Cypress)的大幅面高填充因子图像传感器芯片 LUPA-4000,像素数为 2048×2048,单像素尺寸 12 μm×12 μm.在定制过程中,已去掉 CMOS 芯片外框上的保护玻璃盖,并由北方视技术股份有限公司在感光面上粘贴了一块厚度为 2mm 的光纤面板.四块 FPGA 板的边长均为 130mm×130mm,ARM 板边长为 200mm×200mm.为避免 ARM 板对竖直调节机构的完全阻隔,ARM 板在 PCB 设计时预留有 8 个中心对称分布的直径为 8mm 的通孔,其位置如图 1 中所示.受光锥阵列结构、CMOS 芯片外框和 FPGA 板硬件电路的限制,本探测器中相邻两块 FPGA 板之间的距离只有 4mm 间隙,因而无法在各 FPGA 板之间相邻的侧边上设置水平调节机构,也就是说各 FPGA 板在水平方向沿 X 轴和 Y 轴的平移(包括前推和后拉)和旋转操作只能在不与其它 FPGA 板相邻的另两个侧边上进行.另外,为满足整个探测器扁平化的要求,FPGA 板和 ARM 板在竖直方向的垂直距离不能超过约 40mm,导致通用的多维调节装置无法在本系统中使用,因为通用的多维调节装置需要为每一个维度叠加一个调节层,导致总厚度会远大于 40mm.

如何在紧凑且竖直方向受限的空间内,实现对四块 FPGA 板的多维度调节是本探测器方案设计中的一个难点.本文的设计思想是将水平和竖直方向全部调节节点都作用在同一个调节层上,以最大限度地减小所需的调节空间.

2 耦合机构的实现

为每一块 FPGA 板配备一块固定联动的支撑板,水平和竖直调节机构都作用在支撑板上,以实现在一个调节层上进行多维调节的设计思想.支撑板与 FPGA 板尺寸相同,用层叠方式与相应 FPGA 板固定.所有调节机构均采用千分测微头(简称千分头)实现.

2.1 水平调节机构

为便于实际应用中的微调操作,水平方向所有调节机构均位于 ARM 板外侧.水平调节机构在 X 轴和 Y 轴分别设计成一个同侧推拉结构.单 FPGA 板水平调节机构如图 2.

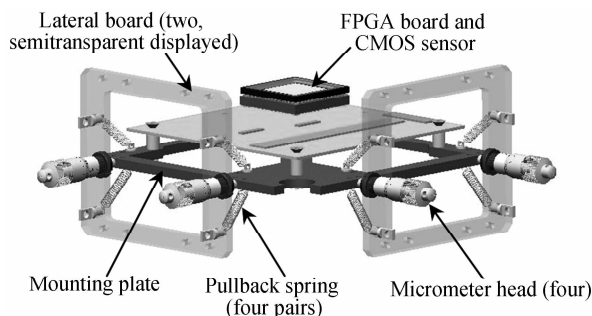


图 2 单 FPGA 板水平调节机构

Fig. 2 Horizontal adjusting mechanisms for one FPGA board

对每一块 FPGA 板,在不与其它 FPGA 板相邻的两个侧边各设置两个千分头微调机构,同时为每个千分头设置上下对称的两根拉簧.在拉伸簧的作用下,支撑板与千分头的螺杆头保持紧密接触.调节两个千分头的螺杆等距地前伸时实现稳定的前推,螺杆等距地缩进则实现稳定的后拉.若调节两个千分头的螺杆不等距地前伸与缩进,就可配合调节另一侧边的两个千分头实现 FPGA 板在水平方向的旋转操作.

2.2 竖直调节机构

利用 ARM 板上的 8 个通孔,实现了可变支点的杠杆式竖直调节机构.单 FPGA 板竖直调节机构如图 3.其中,图 3(a)为侧面正视图,显示了三个千分头与探测器其它组件的位置关系,特别是可以看出千分头_顶 1 和千分头_顶 2 的螺杆穿过 ARM 板上的两个通孔作用在支撑板上的细节.图 3(b)为隐藏了部分组件的旋转视图,便于观察由三个千分头所组成的可变支点的杠杆式竖直调节机构.

竖直调节机构的耦合原理如下:首先,以千分头_顶 1 和千分头_顶 2 为支点,借助千分头_拉产生向下的拉力,通过杠杆原理实现 CMOS 芯片远端点与对应光锥小端面的贴近;同时,调节千分头_顶 1 和千分头_顶 2 的伸缩,即改变杠杆的两个支点的位置,使 CMOS 芯片表面与光锥小端面逐步逼近;重复进行以上两个步骤,可以实现 CMOS 芯片与光锥小端面在竖直方向的精密耦合.

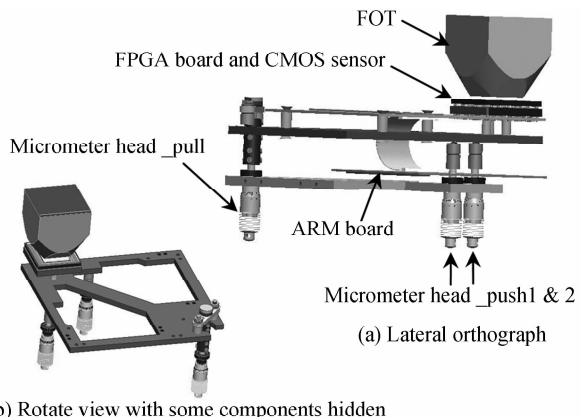


图 3 单 FPGA 板竖直调节机构

Fig. 3 Vertical adjusting mechanisms for one FPGA board

竖直方向调节机构均通过附加的滚珠机构与支撑板滚动接触,以减少支撑板在水平方向运动时的摩擦阻力.三个千分头全部位于 FPGA 板下方,以满足 FPGA 板上方需进行 X 射线防护的需求.

水平调节机构和竖直调节机构都作用在一个调节层上,大幅缩减 FPGA 板与 ARM 板之间所需的调节空间,实现了探测器系统的扁平化设计.探测器整体耦合机构的外形结构如图 4.

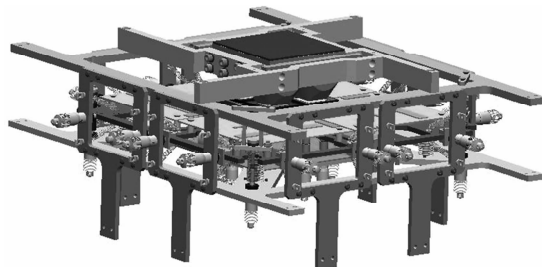


图 4 探测器整体耦合机构的外形结构

Fig. 4 Outline shape of the entire coupling structure of detector

图 5 为耦合后探测器的实物照片.探测器中搭载了 FPGA 下载线缆和开关电源等外围配件,可直接用于图像数据采集.

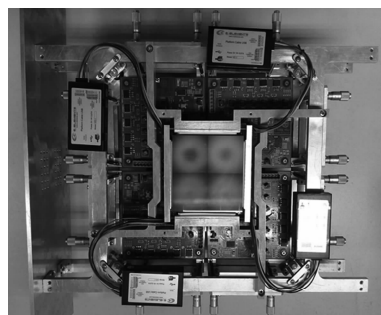


图 5 探测器实物照片

Fig. 5 Photograph of the detector

3 数据采集系统设计

根据本探测器四块 FPGA 板和一块 ARM 板相互独立的结构特点,设计了如图 6 所示的以太网传输数

据采集系统方案. 采用以太网传输替代常用的 USB 传输, 能够满足探测器在 X 射线环境下远程控制及远程

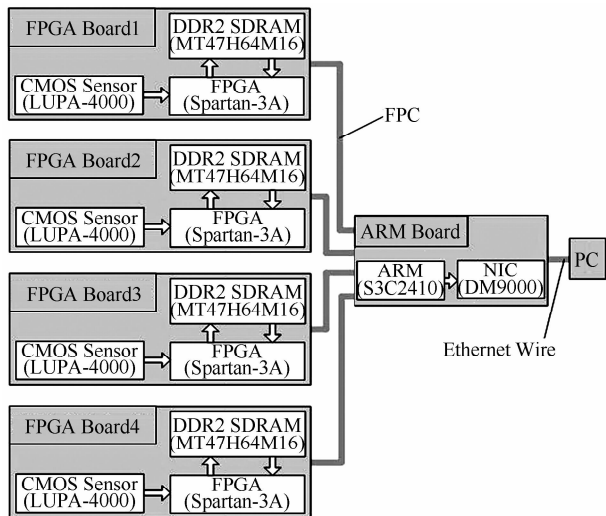


图 6 基于 ARM 和多 FPGA 的以太网数据采集系统
Fig. 6 Ethernet Data Acquisition System based on ARM and multiple FPGAs

数据传输的需求^[14].

ARM 芯片为 Samsung 的 ARM920T 内核的

S3C2410A, 用于实现命令及数据的传输. FPGA 芯片为 Xilinx 为输入输出接口优化的 XC3S400A, 适合完成 LUPA-4000 的时序驱动、DDR2 SDRAM 控制及 FPGA 与 ARM 接口等功能^[15]. 为匹配多 CMOS 芯片图像数据采集速率与以太网数据传输速率之间的差异, 每一块 FPGA 板配置一块 DDR2 SDRAM 芯片 (MT47H64M16) 用作数据缓存.

在多 CMOS 芯片图像数据采集系统中, 各芯片之间命令及数据的传输顺序、各功能模块的启动方式等问题是设计中的重点. 如图 7 所示, 本数据采集系统主要功能大致分为“LUPA-4000 参数配置”和“拍照及数据采集”两个部分. 其中, 在“LUPA-4000 参数配置”部分, 命令及数据都是并行传输的, 即对四颗 LUPA-4000 芯片的参数配置同时进行. 在“拍照及数据采集”部分, 命令及数据以串行传输为主, 串并行交替, 并且接收图像数据模块和网络丢包重传模块无需触发信号就能以串行方式启动. 这种设计方式可以为 3×3 及更大规模光锥阵列耦合探测器数据采集系统的设计提供参考.

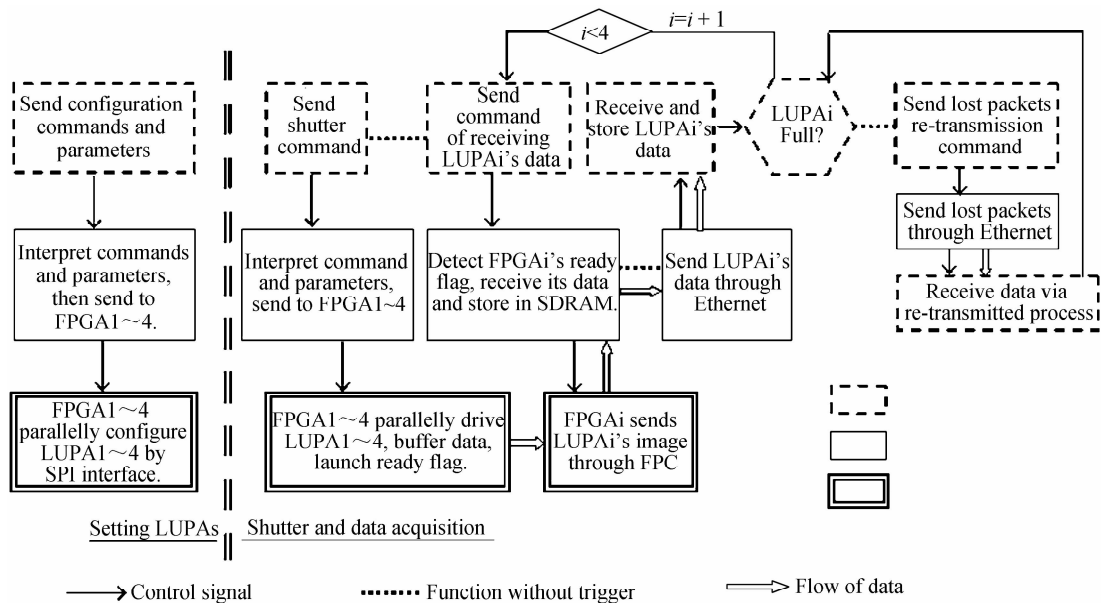


图 7 数据采集系统的命令及数据传输过程框图
Fig. 7 Block diagram of commands and data transmission sequences of the data acquisition

4 探测器测试

由于采用非粘结光锥阵列耦合方式, 光锥小端面与 CMOS 芯片之间耦合的紧密程度相对较差, 探测器所获得的图像中不可避免会引入一定程度的几何畸变. 几何畸变是在光锥与 CMOS 芯片之间产生的, 对 X

射线成像和可见光成像有相同的影响. 考虑到可见光下成像系统的标定成本低很多, 先在可见光环境下对探测器进行测试, 以确定各个芯片畸变校正算法的参数. 为此, 制作了点阵加方框图案的标定板用于图像的几何畸变校正. 图 8 为探测器在可见光环境下测试情况的照片.

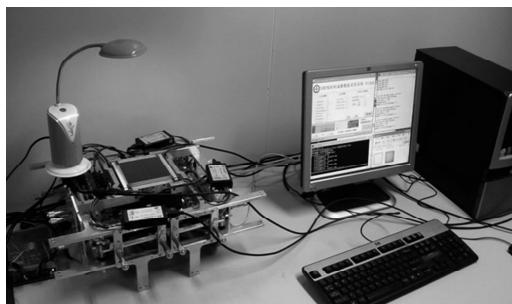


图 8 可见光环境下测试情况的照片

Fig. 8 Photo of the test platform in the visible light environment

1# CMOS 芯片对标定板的测试图像如图 9. 可以看到,图中确实存在较为严重的几何畸变,而且这种畸变是非中心对称的.

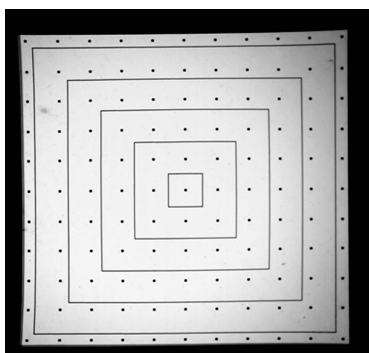


图 9 1# CMOS 芯片对标定板的测试图像

Fig. 9 Tested image of the calibration from 1# CMOS image sensor

对四颗 CMOS 芯片所获得的图像分别采用常用的全局多项式校正算法进行几何畸变校正^[9]. 提取校正后图像的有效信息,并将四颗 CMOS 芯片的图像拼接后形成如图 10 所示的标定板全貌图像. 这里所得到的几何畸变校正算法的参数将直接应用于 X 射线环境图像的几何畸变校正.

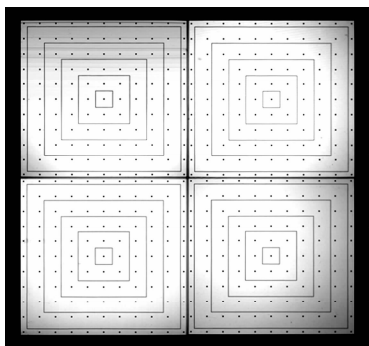


图 10 可见光环境下标定板的拼接图

Fig. 10 Butted image of the calibration board in the visible light environment

目前本课题组所制作的 5 英寸硅深孔阵列像素化 X 射线转换屏由于外接了一套形变校正夹具而无法与本文所实现的探测器紧密连接,所以暂时使用静态分

辨率约为 6lp/mm 的商用钨酸钙增感屏进行 X 射线环境测试. 所用到的测试平台如图 11.



图 11 X 射线环境下测试情况的照片

Fig. 11 Photo of the test platform in X-ray environment

图 12 是在 X 射线环境下拍摄的 X 射线分辨率卡图像,所用到的几何畸变校正算法参数与图 10 相同. 所获得的 X 射线测试图像中仍存在一定程度的几何畸变、拼接误差、亮度均匀性等问题,需要继续调整微调耦合机构并改进图像后期处理算法.

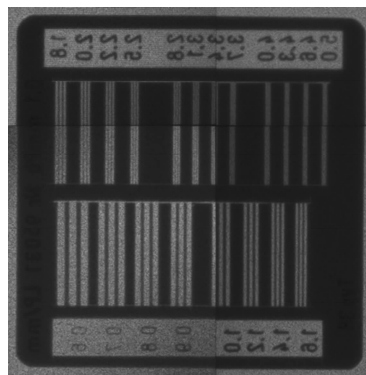


图 12 X 射线分辨率卡的测试图

Fig. 12 Tested image of the X-ray resolution chart

5 结论

本文所提出的 2×2 光锥阵列耦合数字 X 射线探测器方案采用了可微调非粘结的耦合结构,能够在水平和竖直方向均受限的紧凑空间内实现对各 CMOS 芯片的多维度微调. 所有调节机构都作用于同一个调节面,且位于各 FPGA 板和 ARM 板所包围的空间之外以方便实验中的微调操作. 根据探测器的结构特点,设计了一套独特的以 ARM 和多 FPGA 为核心的多 CMOS 芯片数据采集系统. 随着几何畸变校正等后期处理算法的不断完善,本探测器将能够满足科学研究中大面积高分辨率数字 X 射线成像的需求.

致谢

本文作者感谢北方夜视技术股份有限公司总工程师李晓峰和高级工程师张昆林在 CMOS 芯片与光纤面板耦合方面提供的支持和帮助.

参考文献

[1] VASAN S N S, SHARMA P, IONITA C N, *et al.* Image acquisition, geometric correction and display of images from a 2

- ×2 X-ray detector array based on Electron Multiplying Charge Coupled Device(EMCCD) technology[C]. SPIE, 2013, **8668**: 86685J.
- [2] UESUGI K, HOSHINO M, YAGI N. Comparison of lens- and fiber-coupled CCD detectors for X-ray computed tomography[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2011, **18**(2): 217-223.
- [3] SHARMA P, VASAN S N S, TITUS A H, *et al.* A 2x2 array of EMCCD-based solid state X-ray detectors[C]. 34th Annual International Conference of the IEEE EMBS, 2012: 5983-5986.
- [4] FARUQI A R, ANDREWS H N, CATTERMOLE D M, *et al.* A tiled CCD detector with 2×2 array and tapered fibre optics for electron microscopy[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, **477**(1-3): 137-142.
- [5] PHILLIPS W C, STANTON M, STEWART A, *et al.* Multiple CCD detector for macromolecular X-ray crystallography[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2000, **33**:243-251.
- [6] NADAY I, ROSS S, WESTBROOK E M, *et al.* Charge-coupled device/fiber optic taper array X-ray detector for protein crystallography[J]. *Optical Engineering*, 1998, **37**(4): 1235-1244.
- [7] LIU Wei, ZHANG Bo-heng, BIAN Chuan-ping, *et al.* A method of producing testing object in monitoring system of fiber optic taper coupled with TDI-CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1090-1094.
刘蔚,张伯珩,边川平,等. 光锥与 TDI-CCD 耦合监控中测试目标的一种实现方法[J]. 光子学报, 2006, **35**(7): 1090-1094.
- [8] YAN Xiao-mei, WANG Zhi-she. X-ray image device based on optical fiber taper coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1478-1482.
闫晓梅,王志社. 基于光锥耦合的 X 射线像增强器[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1478-1482.
- [9] ISLAM M S, LEWIS R A, UESUGI K, *et al.* A high precision recipe for correcting images distorted by a tapered fiber optic[J]. *Journal of Instrumentation*. 2010, **5**(9): P09008.
- [10] WANG Yao-xiang, TIAN Wei-jian, WANG Li, *et al.* Measurement for modulation transfer function of CCD coupled with fiber optic taper by rectangle bar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 923-926.
王耀祥,田维坚,汪丽,等. 矩形波板法测量光锥与 CCD 耦合器件的光学传递函数[J]. 光子学报, 2005, **34**(6): 923-926.
- [11] WANG Li, TIAN Wei-jian, WANG Yao-xiang, *et al.* Measurement method for modulation transfer function of fiber optic taper coupled with CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 613-615.
汪丽,田维坚,王耀祥,等. 光锥与 CCD 耦合器件调制传递函数的测试方法[J]. 光子学报, 2005, **34**(4): 613-615.
- [12] BADEL X, NORLIN B, KLEIMANN P, *et al.* Performance of scintillating waveguides for CCD-based X-ray detectors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, **53**(1): 3-8.
- [13] SAHLHOLM A, SVENONIUS O, PETERSSON S. Scintillator technology for enhanced resolution and contrast in X-ray imaging [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2011, **648**(0): S16-S19.
- [14] ZHAO Zhi-gang, DU Yang, HUANG Jian-heng, *et al.* Implementation of a CMOS imaging system with adjustable power supplies and driving timing [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(6): 119-125.
赵志刚,杜杨,黄建衡,等. 电源和驱动时序可调整 CMOS 成像系统的实现[J]. 光电工程, 2010, **37**(6): 119-125.
- [15] LIU Xin-ming, LIU Wen, LIU Zhao-hui. Design of a large area array CMOS APS camera system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3235-3239.
刘新明,刘文,刘朝晖. 大面阵 CMOS APS 相机系统的设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(12): 3235-3239.