

基于激光应用的高速相机设计

刘金国¹ 余 达^{1,2*}

(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 100049

摘要 为满足激光应用系统中高分辨率、高帧频、大动态范围要求,使用常规 CCD 作为探测器设计了一种高速相机成像系统。介绍了行间转移面阵 CCD 芯片 KAI-2020D 的工作原理、时序信号的产生及驱动、双路图像数据的整合及输出电路设计;采用高度集成视频处理芯片产生各高速时序信号并使用高速驱动器以满足水平转移信号驱动要求;采用控制器内部的存储器实现图像数据的整合和异步降频等信号处理;通过电子快门实现曝光时间的数字控制以克服 CCD 固有动态范围不满足入射光强变化范围要求。实验结果表明:该相机系统的曝光时间 5 级可调,单级曝光时间为 100~2000 μs ,信噪比大于 40 dB,动态范围不低于 58 dB,基本满足激光应用系统的要求。

关键词 激光应用;探测器;成像系统;信号处理;电子快门;曝光时间;动态范围

中图分类号 TN386.5;P231 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100301

Design of a High-Speed CCD Camera for Laser Applications

Liu Jinguo¹ Yu Da^{1,2}

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To meet the requirements of high frame rate, high resolution and large dynamic range in laser applications, a high-speed CCD camera imaging system is designed by using conventional CCD as the detector. Interline area CCD array KAI-2020D's working principal, timing generation and driving, and two-channel image data's processing are introduced; a integrated video processing chip is used to generate the high-speed timing signals and high-speed drivers are used to drive horizontal signals; controller's internal memory is used for signal processing such as processing the image data and depressing the data transfer rate asynchronously; exposure time is digitally controlled through the electronic shutter, overcome the disadvantage that CCD dynamic range can not meet the requirements of the different range of incident light intensity. The results show that the exposure time can be divided into 5 stages, each stage is 100~2000 μs , minimum adjustable step is 25 ns, signal to noise ratio (SNR) is more than 40 dB, dynamic range is not less than 58 dB, and the maximum frame rate is 35 frame/s, so the camera system meets the requirements of laser applications.

Key words laser application; detector; imaging system; signal processing; electronic shutter; exposure time; dynamic range

OCIS codes 040.5160; 100.2000; 110.2970

1 引 言

CCD 具有信号输出噪声低、动态范围大、量子效率高以及电荷转移效率高等优点,因此在光电探

测及成像领域获得了广泛应用^[1]。CCD 的应用已从可见光扩展到了紫外甚至 X 射线^[2,3]。作为获取图像的关键器件,CCD 目前已广泛应用于各个领

收稿日期: 2011-01-04; 收到修改稿日期: 2011-03-02

基金项目: 国家 863 计划(2008AA121803)资助课题。

作者简介: 刘金国(1968—),男,研究员,主要从事空间遥感,相机成像传感器应用技术等方面的研究。

E-mail: liujg@ciomp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: ciompyuda@163.com

域^[4,5]。

激光具有方向性好、亮度高、单色性和相干性好等优点,在测距、制导、加工、医疗、军事等领域获得了广泛应用^[6]。在各种激光光束或光斑参数的测量方法中,以面阵 CCD 为探测器的测量方法具有其它方法无法比拟的优势;采用 CCD 非接触测量法对激光焦点位置进行检测及控制是激光切割系统中的关键技术之一,具有与计算机结合、精确度高、实时性强等优点^[7];熔池的实时监视是激光焊接监控自动化的关键之一^[8];基于 CCD 的激光模拟射击训练系统可大大降低射击训练的工作量和成本^[9];利用 CCD 作为光敏感器件的激光三角测量技术被广泛的应用于物体位移的速度测量、物体轮廓、尺寸、厚度测量等^[10]。

以上典型激光应用领域对 CCD 相机的分辨率和帧率提出了越来越高的要求,而且入射光强变化范围超过了 CCD 固有的动态范围。本文的相机设计采用一系列高速信号处理方法,研制了高速相机,并使用电子快门控制曝光时间,得到强度范围不同的图像,即用低曝光量得到高强度信息,用高曝光量得到同一场景中低强度信息,然后融合有效像素值可实现动态范围扩展。

2 KAI-2020D 的简介

KAI-2020D 是柯达公司一款行间转移面阵 CCD 图像传感器,其内部结构如图 1 所示。像元尺寸为 $7.4 \mu\text{m}$,有效像元数为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$,可以单或双通道方式输出模拟 CCD 图像信号,其最大像素时钟频率为 40 MHz ,在双通道工作方式时最高输出帧频可达 35 frame/s 。该 CCD 可通过电子快门实现精细的曝光时间控制,也可通过快线倾泻门(FD)的高电平来快速倾泻掉不需要的电荷信号从而提高帧频。

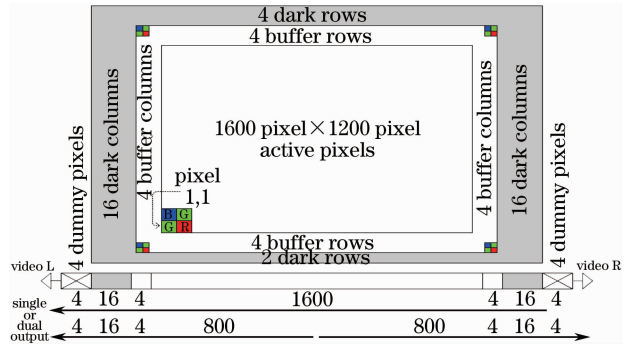


图 1 KAI-2020D 结构示意图

Fig. 1 Structure of KAI-2020D

3 高速相机系统设计

高速相机系统的结构如图 2 所示,其工作原理是:成像光学系统的像面耦合到 CCD 的焦平面上,光学镜头视场内的目标将成像于 CCD 传感器的焦平面上,在 CCD 的感光区产生出电荷数量和输入光能量成线性关系的感生电荷;计算机作为整个相机系统的主控制器,通过 RS485 总线向控制器发出各种命令:摄像开始、摄像结束、积分时间、积分级数及被倾泻的行数和行地址;控制器产生 CCD 的垂直转移信号,经垂直驱动电路后输出满足特殊电平值和功率值的垂直驱动信号;同时,控制器通过 I²C 接口对视频处理器内部的各寄存器值进行设置,并实时发出控制信号,控制视频处理器输出特殊要求的水平转移信号,经水平电路驱动后输出满足特殊电平值和功率值的水平驱动信号; CCD 感光区域的电荷受垂直和水平转移信号控制,以 40 MHz 像素时钟频率的双通道输出模拟视频信号,经预放大器后送入视频处理器;经相关双采样、可编程增益放大和 A/D 转换后以双路 14 bit 位宽、 40 MHz 像素时钟频率时钟输出数字图像数据到控制器中;控制器利用其内部的存储器对两路图像数据以行为单位进行

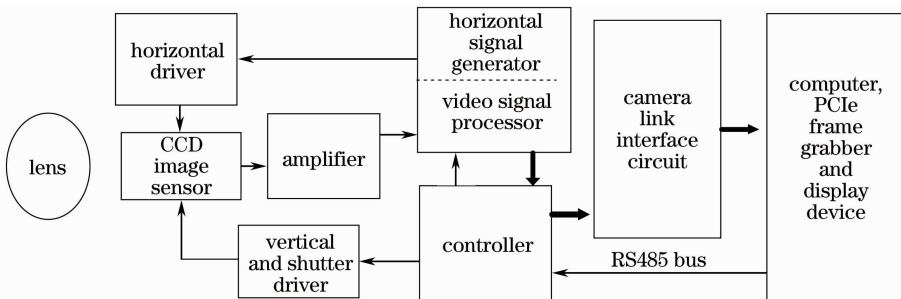


图 2 高速相机系统结构图

Fig. 2 Structure of high speed camera system

数据整合并经降频处理,最终以 70 MHz 像素时钟频率 14 bit 位宽 Camera Link 接口输出,使用台湾凌华公司的 PCIe-CPL64 采集卡进行图像数据的存储和实时显示。

3.1 时序信号的产生

垂直转移和电子快门的驱动信号的工作频率低,直接由控制器 FPGA 产生;水平转移和视频处理相关信号由专用视频处理芯片 AD9979 产生。集成视频处理器 AD9979 的内部结构框图如图 3 所示。

ADC 的最高工作频率为 65 MHz,位宽为

14 bit;通过 I²C 接口对内部寄存器进行设置,在输入时钟 CLI 和控制信号 VD 及 HD 的控制下,内部精细时序核可产生水平时序和视频处理相关信号;芯片内部可提供 1.8 V 的输出电压,故芯片工作时仅需提供 3.3 V 电源;CDS 的增益可以设置为 -3、0 和 3 dB,VGA 的增益可设置为 6~42 dB;当输入时钟频率为 65 MHz,输出信号相位精度为 0.24 ns。本设计采用 AD9979 芯片,水平时序信号的产生和视频处理集成在芯片内部,通过对内部寄存器的设置完成所有输出时序信号的控制,当像素时钟频率为 40 MHz 时各输出信号相位精度为 0.39 ns。

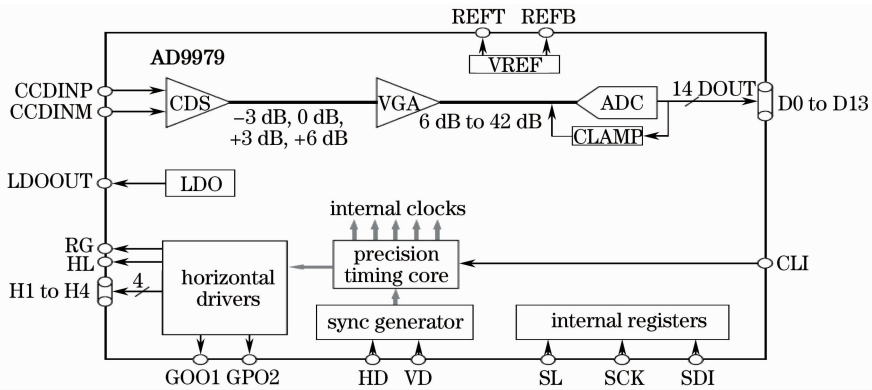


图 3 AD9979 内部结构示意图

Fig. 3 Inner structure of AD9979

3.2 时序信号的驱动

工作电压高的电子快门和上升、下降沿较低的 FD 采用分立的三极管驱动,其余电路都采用集成驱动器加上交流耦合电路及嵌位电路组成;如图 4 所示,驱动时序信号经集成驱动器进行功率放大后输出满足幅度和驱动电流要求的驱动信号,经交流耦合电路去除直流电平后再经嵌位电路输出满足电平要求的驱动信号。

ISL55110 来实现水平转移信号的驱动,如图 5 所示,此芯片内部包含两组高速 MOSFET 驱动器,可用于精确的脉冲产生,超高速 CCD 摄像和时钟产生等电路。此芯片输出电压范围宽、导通电阻低,能以很快的上升和下降沿驱动各种阻性和容性负载,满足 CCD 阵列高速运行要求;芯片兼容 3.3 V 和 5 V 的电平输入要求;输出脉冲信号的幅度在 5~13 V 之间,输出电流可达到 3.5 A,在 100 pF 负载的情况下上升和下降沿仅 1.5 ns。

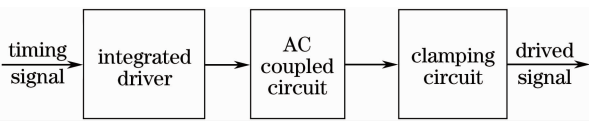


图 4 水平驱动电路示意图

Fig. 4 Diagram of horizontal driving circuit

CCD 管脚的模型为电容,其两端的电压 u 变化和驱动电流 i 的关系为

$$i = c \frac{du}{dt}$$

式中 c 为 CCD 管脚的等效电容值,由于水平转移信号的工作频率高,其上升和下降沿时间短,故驱动器的驱动功率取决于驱动电流的大小。

本设计采用 Intersil 公司的高速 CCD 驱动器

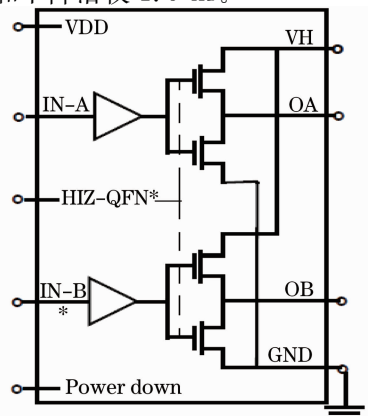


图 5 ISL55110 的内部结构示意图

Fig. 5 Inner structure of ISL55110

3.3 双路数字 CCD 数据的整合及输出

若直接对单路 14 bit 位宽 80 MHz 像素时钟频率 CCD 图像数据进行 LVDS 传输数据,至少需要 17 对差分线;当使用 Camera Link 接口来传输数据时,仅需要 5 对差分线来传送数据,但传输数据的速率越高,在相同的传输距离情况下出现误码的几率就越大。如图 6 所示,本设计直接采用 FPGA 内部的存储器以行为单位进行图像数据的整合和缓冲;将双路输入 40 MHz 时钟频率 14 bit 位宽的图像数据经乒乓结构的双口 RAM 进行整合,然后送入异步 FIFO 进行降频。

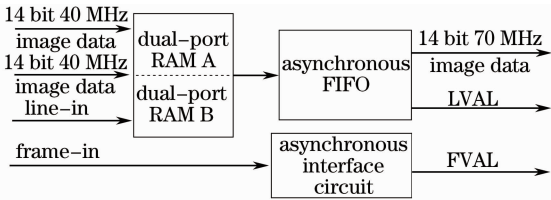


图 6 高速图像数据处理示意图

Fig. 6 Diagram of high speed digital data process

本设计利用 CCD 工作的消隐时间,通过异步 FIFO 将 CCD 输出的数据由 80 MHz 降频到 70 MHz,只需使用一根普通的 Camera Link 电缆就能稳定地传输数据,实时显示图像,并存储到电脑硬盘。图 7 为帧有效信号的异步接口电路,WO 为输入的帧有效信号,CLK 为 70 MHz 时钟,SHAKE 为新产生的帧有效信号。

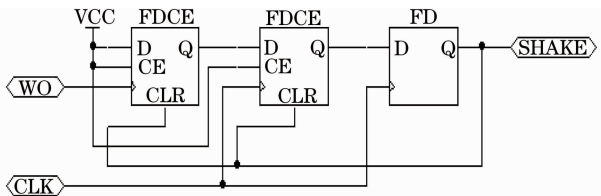


图 7 异步接口电路图

Fig. 7 Diagram of asynchronous interface circuit

3.4 控制器程序设计

此高速相机可根据激光应用系统的实际需要,调整曝光时间和改变每帧中输出图像数据的行数,所有工作参数的改变都通过 RS485 串行通信来实现;整个程序采用多重状态机循环,主状态机如图 8 所示分为开机默认场循环参数写入状态机、场循环状态机和新场循环参数状态机;3 个状态机中包含了更小的子状态机。在主状态机循环中,开机上电时首先进入开机默认场循环参数写入状态机,待默认参数配置完毕后进入场循环状态机,按默认的参数输出各时序信号;当接收到有效的新工作参数时,

进入到新场循环参数写入状态机,待新参数配置完毕后进入场循环状态机,按新参数输出各时序信号。

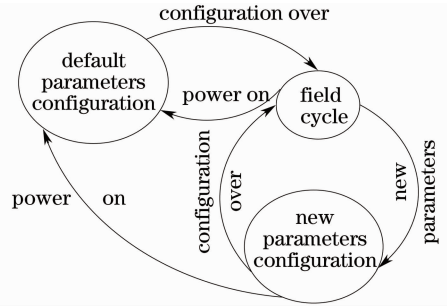


图 8 主状态机循环图

Fig. 8 Diagram of main state machine

4 实验结果

调试中,水平转移时钟频率为 40 MHz,以双通道方式输出 CCD 信号,示波器为 DSO5054(采样频率为 4 GHz,带宽为 500 MHz)。图 9 为双路输出的 CCD 信号;图 10 为拍摄的图像。

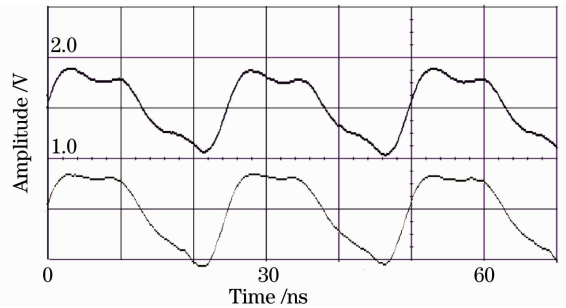


图 9 双路 CCD 输出信号实测波形

Fig. 9 Real waveform of two channel CCD output signal



图 10 高速相机拍摄的图像

Fig. 10 High speed camera image

该相机系统的曝光时间可分 5 级可调,单级曝光时间为 100~2000 μ s,调整精度为 25 ns,信噪比大于 40 dB,动态范围不低于 58 dB,最高帧频为 35 frame/s;当使用 FD 脚的高电平倾泻掉下方的 600 行而只输出上方的 600 行时,帧频可达到 60 frame/s。

5 结 论

为满足激光焊接、切割,激光光斑或光束的参数测量,激光模拟射击训练和激光三角测量等激光应用系统中高分辨率、高帧频、大动态范围要求,使用常规 CCD 设计了一种高速相机系统。采用高度集成视频处理芯片产生各高速时序信号,并使用高速驱动器以满足水平转移信号驱动要求;采用控制器内部的存储器实现图像数据的整合和异步降频;通过电子快门信号可实现曝光时间的数字控制以克服 CCD 固有动态范围不满足入射光强变化范围要求;通过 FD 脚的高电平可清除不需要的 CCD 输出信号以提高帧频。实验结果表明:该相机系统可分 5 级进行曝光时间的控制,每级曝光时间可在 100~2000 μs 之间调整,调整的最小时间间隔为 25 ns;信噪比大于 40 dB,动态范围大于或等于 58 dB,帧频最高可达 35 frame/s,基本满足激光应用系统的特殊要求,有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- Zhou Huaide, Liu Haiying, Xu Dong *et al.*. Study of TDI pattern for interline transfer progressive scan CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, **16**(9): 1629~1634
周怀得, 刘海英, 徐 东等. 行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1629~1634
- Liu Jinguo, Yu Da, Zhou Huaide *et al.*. Study of high speed driver system for area-CCD KAI-1010M [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, **16**(9): 1622~1628
刘金国, 余 达, 周怀得等. 面阵 CCD 芯片 KAI-1010M 的高速驱动系统设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1622~1628
- Chen Ji, Wang Xin, Cao Jiuda *et al.*. Development of high-speed CCD laser displacement sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, **16**(4): 611~616
陈 骥, 王 鑫, 曹久大等. 高速 CCD 激光位移传感器[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(4): 611~616
- Li Binkang, Guo Ming'an, Zhang Haibing *et al.*. High frame rate CCD acquisition method and system for remote real-time, China, 200910021209.5[P]. 2009-8-5
李斌康, 郭明安, 张海兵等. 高帧频 CCD 图像远程实时采集方法及系统: 中国, 200910021209.5[P]. 2009-8-5
- Tong Zilei. Compensation technology for the image motion of CCD camera[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(9): 628~632
童子磊. CCD 相机的像移补偿技术[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(9): 628~632
- Zhou Jiankang. Improvement of CCD Dynamic Range with Image Fusion for Laser Spot Detection[D]. Suzhou: Suzhou University, 2006. 3~14
周建康. 利用图像融合提高 CCD 的动态范围进行激光光斑检测 [D]. 苏州: 苏州大学, 2006. 3~14
- Xiao Jinling, Yu Yao. Design and implementation of positon control system for beam focus during laser cutting process based on CCD [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2006, **21**(4): 42~46
肖金陵, 虞 瑶. 基于 CCD 的激光切割焦点位置控制系统的设计与实现[J]. *光电技术应用*, 2006, **21**(4): 42~46
- Lin Kun, Zhou Zude, Chen Youpin *et al.*. Study of laser welding pool video monitroing system based on CCD[J]. *Mechanical and Electronic*, 1999, (6): 36~38
林 昆, 周祖德, 陈幼平等. 基于 CCD 的激光焊接熔池视频监控系统的研究[J]. *机械与电子*, 1999, (6): 36~38
- Yu Qingguang, Zhang Xiaoming, Wang Hao *et al.*. Acquisition and identification system of laser dot from CCD video signal[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(s2): 1365~1366
于庆广, 张晓明, 王 浩等. CCD 视频采集系统设计和实现 [J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(s2): 1365~1366
- Yan Weibin. Data Collection and Process For CCD Signal[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004. 8~28
颜伟斌. CCD 信号数据采集及处理[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004. 8~28