

文章编号:1002-158X(2003)03-0361-04

基于 CCD 与 CMOS 的图像传感技术*

王忠立,刘佳音,贾云得

(北京理工大学 计算机科学与工程系,北京 100081)

摘 要:概述了 CCD 图像传感器的原理、特点及发展趋势。对 CMOS 图像传感器的结构和工作原理,尤其是 CMOS 与 CCD 两类图像传感之间的不同进行综述。重点介绍了 CMOS 图像传感器的研究现状和发展趋势。

关 键 词:图像传感器;CCD;CMOS;智能 CMOS 图像传感器

中图分类号:TP212.14;TN304.91 文献标识码:A

Image sensing technology based on CCD and CMOS

WANG Zhong-li, LIU Jia-yin, JIA Yun-de

(Dept. of Computer Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The principles, characteristics and development of CCD are summarized. The architectures and principles of CMOS image sensor are introduced. Specially, the differences between two image sensors are synthesized. The current research status and development of CMOS image sensor was focused.

Key words: image sensor; CCD; CMOS; intelligent CMOS image sensor

1 引 言

70 年代初,随着 MOS 技术的成熟,三种典型的固体图像传感—电荷耦合器件(CCD)、电荷注入器件(CID)、光敏二极管阵列(PDA)得到了发展。在这三种固体图像传感器中,CCD 发展最为迅速。CCD 器件及其应用技术的研究取得了惊人的进展。到 90 年代初,CCD 技术已比较成熟。作为一种新型光电转换器被广泛应用,特别是在图像传感和非接触式测量领域的发展则更为迅猛。随着 CCD 应用范围的扩大,其缺点逐渐暴露出来。为此,人们又开发了另外几种固体图像传感器技术。其中,最引人注目、最有发展潜力的是 CMOS 图像传感器,它能获得和 CCD 产品相似的图像质量,且在功耗、集成度上都取得了很大突破。CMOS 图像传感器具有许多优点,如芯片内部集成了 A/D 转换器、输出为数字信号、外围线路简单、工作时不需要相位驱动脉冲、价格便宜等,这些优点使其很适合于桌面多媒体、视频会议、图像监控等场合。

目前用于图像传感的器件主要有 CCD 和 CMOS 两大类。就目前的应用情况来看,CMOS 器件的成像质量还不如 CCD 器件的成像质量好。但由于 CMOS 的很多优点,使得其一出现便受到广泛关注,其应用领域也逐渐扩大。CMOS 器件在工艺等方面的改进,成像质量的改善,系统集成技术的应

用将进一步促进 CMOS 图像传感器在各个领域内的应用。

2 CCD 图像传感器及发展

2.1 CCD 工作原理及其特点简述^[1-6]

电荷耦合器件(CCD)的突出特点是以电荷为信号,而不同于其它大多数器件是以电流或者电压为信号。构成 CCD 的基本单元是 MOS(金属-氧化物-半导体)结构。CCD 的基本功能是电荷的存储和电荷的转移。工作时,需要在金属栅极加上一定的偏压,形成势阱以容纳电荷,电荷的多少基本与光强成线性关系。电荷读出时,在一定相位关系的移位脉冲作用下,从一个位置移动到下一个位置,直到移出 CCD,经过电荷-电压变换,转换为模拟信号。由于 CCD 每个像元的势阱容纳电荷的能力是有一定限制的,如果光照太强,一旦势阱中被电荷填满,电子将产生“溢出”现象。另外,CCD 的电荷读出时,是从一个位置到下一个位置的电荷转移过程,存在电荷的转移效率和转移损失问题。

CCD 图像传感器的结构和工作原理,决定了这类器件有以下优点:

- (1) CCD 是一种固体化器件,体积小、重量轻、可靠性高、寿命长;
- (2) 图像畸变小、尺寸重现性好;
- (3) 具有较高的空间分辨率;

* 收稿日期:2002-10-25;收到修改稿日期:2002-11-25

作者简介:王忠立(1970-)男,北京理工大学讲师,博士,从事实时图像处理、计算视觉、图形学研究。

(4) 光敏元间距的几何尺寸精度高,可获得较高的定位精度和测量精度;

(5) 具有较高光电灵敏度和较大动态范围。

2.2 TDI-CCD 图像传感器^{7,81}

TDI(Time delayed and integration)CCD(即时间延迟积分 CCD)是近几年发展起来的一种新型光电传感器。TDI CCD 是基于对同一目标多次曝光,通过延迟积分的方法,大大增加了光能的收集,与一般线阵 CCD 相比,它具有响应度高、动态范围宽等优点。在光线较暗的场所也能输出一定信噪比的信号。可大大改善环境条件恶劣引起信噪比太低这一不利因素。在空间对地面的遥感中,采用 TDI-CCD 器件作为焦平面探测器则可以减小相对孔径,从而减小探测器重量和体积。因此 TDI-CCD 器件一出现,便在工业检测、空间探测、航天遥感、微光夜视探测中得到了广泛的应用。

TDI-CCD 和普通的线阵 CCD 的工作原理有所不同,它要求行扫描率和目标的运动速率严格同步,否则不能正确的提取目标的图像信息。当应用 TDI CCD 对运动目标成像时,与其它视频扫描方法相比,其具有一系列优点,其中包括灵敏度高、大动态范围等。它允许在限定光强时提高扫描速度,或在常速扫描时减小照明光源的亮度,减小功耗,降低成本。此外,还有一突出优点,就是在推帚方式成像时,可在很大程度上消除像移。

2.3 CCD 图像传感器的发展趋势

CCD 图像传感器经过 30 多年的发展,从最初简单的 8 像元移位寄存器发展至今,已具有数百万至上千万像元。由于 CCD 图像传感器具有很大的潜在市场和广阔的应用前景,因此,近年来国际上在这方面的研究工作进行得相当活跃,很多国家均投入了大量的人力、物力和财力,在 CCD 图像传感器的研究和应用方面取得了瞩目的成果。从目前 CCD 技术的发展趋势来看,主要有以下几个方向:

(1) 高分辨率。目前 CCD 像元数已从 100 万像元提高到 2000 万像元以上,大面阵、小像元的 CCD 摄像机层出不穷。美国 EG&G·Reticon 研制出 8192×8192 像元高分辨率 CCD 图像传感器。随着超大规模微细加工技术的发展,CCD 传感器的分辨率将越来越高。

(2) 高速度。对于某些特殊高速瞬态成像场合(如拍高速飞行弹头的飞行姿态),要求 CCD 具有更高的工作速度和灵敏度。CCD 频率特性受电荷转移速度的限制,时钟脉冲电压变化太快,电荷来不及完全转移就会造成转移效率大幅度降低。为保证器件具有较高的转移效率,时钟电压变化必须有一个上限频率,即 CCD 的最高工作频率。因此,提高电

荷转移效率和提高器件频率特性是提高 CCD 质量的关键。

(3) 微型、超小型化。微型、超小型化 CCD 的发展是 CCD 技术向各个领域渗透的关键。随着国防科学、生物医学工程、显微科学的发展,十分需要超小型的 CCD 传感器。CCD 芯片的微型化能够提高它的分辨率,提高硅片利用率、提高产品的质量和产品的成品率及降低成本。

(4) 新型器件结构。为了提高 CCD 像传感器的性能,扩大使用范围,需要不断地研究新的器件结构和信号采集、处理方法,赋予 CCD 图像传感器更强的功能。在器件结构方面,有帧内线转移 CCD(FIT CCD)、虚像 CCD(VP CCD)、亚电子噪声 CCD(NSE CCD)。此外,随着 VLSI MOS 工艺的日益完善,MOS 光电二极管阵列发展前景很是乐观,由此产生的电荷引动器件(CPD)已经用于单片彩色摄像机中。

(5) 微光 CCD。由于夜空的月光和星光辐射主要是可见光和近红外光,其波段正好在硅 CCD 响应范围内。因此,CCD 刚一诞生,美国以 TI、仙童为代表的一些电子公司就开始研制微光 CCD,如增强型 CCD(ICCD)。当前的微光 CCD 的最低照度可达 $10^{-6}lx$,分辨力优于 510TVL。

(6) 多光谱 CCD 器件。除可见光 CCD 图像传感器外,目前红外及微光 CCD 技术已经得到应用。正在研究 X 射线 CCD、紫外 CCD、多光谱红外 CCD 等,以拓展 CCD 的应用领域。

3 CMOS 图像传感器及最新发展

3.1 CMOS 图像传感器的结构及工作原理

CMOS 图像传感器的像素结构目前主要有两种:无源像素图像传感器 PPS(Passive Pixel Sensor)和有源像素图像传感器 APS(Active Pixel Sensor),如图 1 所示。由于 PPS 信噪比低、成像质量差,目前应用中绝大多数 CMOS 图像传感器采用的是 APS 结构。APS 结构的像素内部包含一个有源器件,该放大器在像素内部具有放大和缓冲功能,具有良好的消噪功能,且电荷不需要像 CCD 器件那样经过远距离移位到达输出放大器,因此避免了所有与电荷转移有关的 CCD 器件的缺陷。

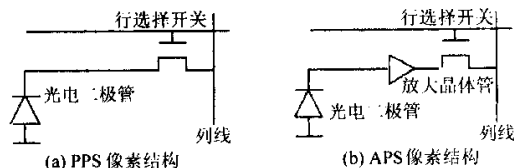


图 1 CMOS 的两种像素结构

由于每个放大器仅在读出期间被激发,将经光电转换后的信号在像素内放大,然后用 X-Y 地址方式读出,提高了固体图像传感器的灵敏度。APS 像素单元有放大器,它不受电荷转移效率的限制,速度快,图像质量较 PPS 得到明显改善。但是,与 PPS 相比,APS 的像素尺寸较大、填充系数小,其设计填充系数典型值为 20%~30%。

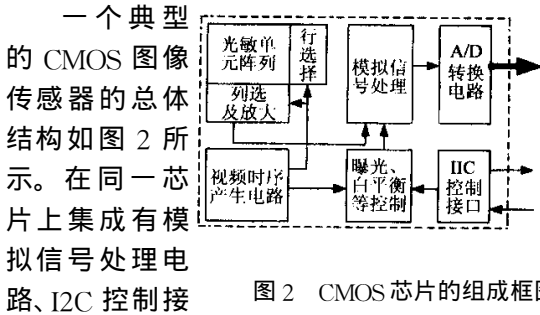


图 2 CMOS 芯片的组成框图

片上模拟信号处理电路主要执行相关双采样(CDS, Correlated Double Sampling)功能。片上 A/D 转换器可以分为像素级、列级和芯片级几种情况,即每一个像素有一个 A/D 转换器、每一列像素有一个 A/D 转换器,或者每一个感光阵列有一个 A/D 转换器。由于受芯片尺寸的限制,像素级的 A/D 转换器不易实现。CMOS 芯片内部提供了一系列控制寄存器,通过总线编程(如 I2C 总线)来对自动增益、自动曝光、白色平衡、 γ 校正等功能进行控制,编程简单、控制灵活。直接输出的数字图像信号可以很方便地和后续处理电路接口,供数字信号处理器对其进行处理。

3.2 CMOS 与 CCD 之间的比较

CMOS 和 CCD 图像传感器在结构和工作方式上的差别,使得在应用中也存在很大不同。主要有以下几个方面:

(1) 驱动脉冲电路。CMOS 芯片内部集成了驱动电路,大大简化了硬件设计,同时也降低了系统功耗。

(2) 集成度。CMOS 图像传感器可将光敏元件、图像信号放大器、信号读取电路、模数转换器、图像信号处理器及控制器等集成到一块芯片上。

(3) 读取速度。CCD 信号输出速度较慢,CMOS 图像传感器在采集光信号的同时就可以取出电信号,还能实时处理各单元的图像信息,速度比 CCD 图像传感器快很多。

(4) 功耗。CMOS 光电传感器使用单一电源,耗电量非常小、节能。

(5) 价格。从目前的市场看,CCD 器件的价格要远远高于 CMOS 器件。

(6) 带宽。CMOS 具有低的带宽,并增加了信万方数据

噪比。还有一个固有的优点是:防模糊(Blooming)特性。在像素位置内产生的电压先是被切换到一个纵列缓冲区内,再被传送到输出放大器中。由于电压是直接输出到放大器中去,就不会发生传输过程中的电荷损耗以及随后产生的图像模糊现象。不足之处是每个像素中的放大器的阈值电压都有着微小差别,这种不均匀性会引起“固定模式噪声”。

(7) 访问灵活性。CMOS 具有对局部像素图像的编程随机访问的优点。如果只采集很小区域的窗口图像,可以获取很高的帧频。这是 CCD 图像传感器很难做到的。

(8) 填充系数。由于 CMOS 的集成度高,单个像素的填充系数远低于 CCD。

3.3 CMOS 图像传感技术的最新发展

目前 CMOS 图像传感器的研究与发展趋势主要有以下几个方面:

(1) 多功能、智能化。传统的图像传感器仅仅局限于获取被摄对象的图像,图像的传输、处理需要单独的硬件和软件来完成。由于 CMOS 图像传感器在系统集成上的优点,可以从系统级水平来设计芯片。如可以在芯片内集成相应的功能部件应用于特定领域,如 Transchip 公司开发的高质量手机用摄像机,内部集成了 ISP,并整合了 JPEG 图像压缩功能。也可以从通用角度考虑,在芯片内部集成通用微处理器(如 Trimedia Processor)。为了消除数字图像传输的瓶颈,还可以将高速图像传输技术(如 Firewire、USB、基于 LVDS 的高速并行传输)集成到同一块芯片上,形成片上系统型数字相机(Digital Camera System on Chip)和智能 CMOS 图像传感器(Intelligent CMOS Image Sensor)。斯坦福大学的 PDC(Programmable Digital Camera)研究小组和一些专业厂商合作,研究新的图像处理算法、体系结构和电路设计,致力于单片 PDC 的研究。

(2) 高帧速率。由于 CMOS 图像传感器具有访问灵活的优点,可以通过只读出感光面上感兴趣的很小区域来提高帧速率。同时,CMOS 图像传感器本身在动态范围和光敏感度上的提高,也有利于帧速率的提高。国家半导体生产的 LM9630 可达到 600 帧/s 的速度。斯坦福大学的 PDC(Programmable Digital Camera)研究小组开发的单片 PDC,在 352×288 分辨率下,可达 10,000 帧/s。Dalsa 公司宣称其生产的 CMOS 图像传感器最高可达 20,000 帧/s。Micron 公司的 MT9M413C36ST 在 1280×1024 分辨率下可以达到(0~500)帧/s 的帧速率,部分扫描时可达 10,000 帧/s。

(3) 宽动态范围。以色列工业大学(Israel Institute of Technology)的 VLSI 系统研究中心将用于

CCD 和 TDI CCD 的自适应敏感技术用于 CMOS 传感器中,使 CMOS 传感器的整个动态范围可达 84dB,并在一个 64×64 的芯片上进行了实验。NASA 的 JPL 实验室也致力于将 TDI CCD 的工作模式用于 CMOS 图像传感器中。

(4) 高分辨率。目前 CMOS 图像传感器最高分辨率可达 3170×2120 像素,约 6.6M 像素。

(5) 低噪声技术。目前用于科学研究的高性能 CCD 能达到的噪声水平为 3~5 个电子,而 CMOS 图像传感器则为 300~500 个电子。JPL 实验室采用 APS 技术的图像传感器能达到 14 个电子。

(6) MCSI (Multiple Capture Single Image) 技术。Stanford 大学电子工程与心理学系研究提出 MCSI 技术。该技术在同一块芯片上加工出一个 2×2 的 CMOS 成像阵列,阵列上的每个成像单元可以独立对场景成像,不同成像单元的输出信号经过可控方式合成,再经过 A/D 转换输出数字图像,由于各个成像单元的成像属性不同,输出信号为各个成像单元输出信号在时间和空间上的一种累加结果,改善了 CMOS 图像传感器在恶劣的光线环境下的成像质量。

(7) 模块化、低功耗。由于 CMOS 图像传感器便于小型化和集成,可以根据特定应用场合,将相关的功能集成在一起,并通过优化设计,以进一步降低功耗。如 Fujitsu 公司生产的 MB86S02A 成像模块,最低功耗仅为 15mW/15FPS。

总之,CMOS 图像传感器正在向高分辨率、高动态范围、高灵敏度、集成化、智能化的方向发展。芯片加工工艺不断发展,从 $0.5\mu\text{m} \rightarrow 0.35\mu\text{m} \rightarrow 0.25\mu\text{m} \rightarrow 0.18\mu\text{m}$,接口电压也在不断降低,从 5V \rightarrow 3.3V \rightarrow 2.5V/3.3V \rightarrow 1.8V/3.3V。随着 CMOS 电路消噪技术的进步^[9],采用新工艺和改善相关双采样电路能有效地降低固定模式噪声。提高 CMOS 图像传感器综合性能,缩小单元尺寸,调整 CMOS 工艺参数,将数字信号处理电路、图像压缩、通讯等电路集成在一起,并制作滤色片和微透镜阵列,以实现低成本、低功耗、低噪声、高度集成的单芯片成像微系统。这在微型机电系统 (MEMS)、微型光机电系统 (MOEMS) 中有重要应用。随着空间技术的发展,将 CMOS 应用于空间技术中^[10],如遥感成像、太阳敏感器、星敏感器等,也是目前研究的方向。

4 未来发展趋势

从 CMOS 与 CCD 目前的应用及技术发展看,未来的发展趋势存在以下几种可能:

(1) CMOS 可能成为主流

CMOS 与 90% 的其它半导体都采用相同标准的芯片制造技术,而 CCD 则需要一种极其特殊的制造工艺,故 CCD 的制造成本高得多。由此看来,具有较高解像率、制作成本低得多的 CMOS 器件将会得到发展。随着 CMOS 图像传感器技术的进一步研究和开发,过去仅在 CCD 上采用的技术正在被应用到 CMOS 图像传感器上,CCD 在这些方面的优势也逐渐黯淡,而 CMOS 图像传感器自身的优势正在不断的发挥,其光照灵敏度和信噪比可达到甚至超过 CCD。基于此,我们可以预测,CMOS 图像传感器将会在很多领域取代 CCD 图像传感器,并开拓出新的更广阔的市场。

(2) CCD 与 CMOS 技术互相结合

TI 公司数字图像传感器产品部的研究人员做成了 CCD 和 CMOS 混合的图像传感器——BCMD (体电荷调制器件),兼有 CCD 和 CMOS 技术两者的优点,即低成本和高性能。BCMD 传感器利用了这两种传感器的长处但不继承它们的缺点,因而消除了许多障碍。主要优点有:a)消除了 CCD 图像传感器的驱动要求;b)可以实现单片系统集成和简化的电源设计,成本低;c)暗电流很小。暗电流的减小得益于所谓的表面态锁定技术;d)低噪声,是由于采用了相干性双取样电路。这种电路能有效抑制由于器件失配而引起的像素固定模式噪声和消除复位噪声;e)采用工业标准的 5V 和 3.3V 电源,淘汰了 CCD 所需的复杂、昂贵的非标准电源电压。

通过采用 BCMD 传感器,数字式和模拟式摄像机的设计师将可以实现更好的性价比,而且数字式摄像机将变得更为经济。这将刺激 PC 用户的其它图像应用。

参考文献:

- [1]程开富. CCD 图像传感器的市场与发展[J]. 国外电子元器件, 2000(2): 2—7
- [2]陈义飞. CCD 模拟信号处理电路的发展[J]. 半导体技术, 1996(4): 30—32
- [3]魏仲慧. CCD 时序信号发生器电路的设计[J]. 光学精密工程, 1996, 4(2): 91—93
- [4]江孝国. 可编程逻辑器件构成的 CCD 驱动器[J]. 国外电子元器件, 1996(11): 41—43
- [5]于前洋. 作为图像传感器的 CCD、ICCD 和 IR CCD[J]. 光学精密工程, 1994, 2(5): 8—16
- [6]张万鹏. CCD 及其在象感领域的应用[J]. 半导体技术, 1995(2): 8—13
- [7]颜树华,叶湘滨,吕海宝. 基于 TDI CCD 的高速小目标交汇测量系统[J]. 光学技术, 2000, 26(3): 238—240
- [8]林家明,张祥. CCD 摄像机 TDI 模式及实时显示技术研究[J]. 光学技术, 2000, 26(3): 283—288
- [9]朱苏磊,韩焱. CMOS 图像传感器的消噪技术[J]. 华北工学院测试技术学报, 2000, 14(2): 87—92
- [10]尤政,李涛. CMOS 图像传感器在空间技术中的应用[J]. 光学技术, 2002, 28(1): 31—35