

基于数字微镜器件技术提高面阵 CCD 相机 动态范围的研究

周 望

(苏州大学现代光学技术研究所江苏现代光学技术省重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要 提出了一种采用数字微镜(DMD)器件作为 SLM 调制面阵 CCD 的设计方法。解决普通 CCD 相机在拍摄高反差场景时,图像上出现过曝光或欠曝光,造成丢失细节的现象。该方法通过场景预测成像,确定 CCD 按多曝光区域的划定和曝光时间。利用 DMD 微镜调制功能,实现 CCD 分区分时曝光。同时设计一种图像数据结构提高了面阵 CCD 动态范围。实验证明,该方法不但提高了成像质量,高亮和背光处细节可清晰地表现。而且增强了图像数据的动态范围。实现了实时获取高动态范围、高质量的图像及数据,不再需要软件“融合”。

关键词 图像处理; 成像系统; 数字微镜器件; 高动态范围图像; 面阵 CCD

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092903.0638

Study on Enhancing Dynamic Range of CCD Image Based on Digital Micro-Mirror Device

Zhou Wang

(*Modern Optical Technology Institute of Soochow University and Province Key Laboratory of
Modern Optical Technology of Jiangsu, Suzhou, Jiangsu 215006, China*)

Abstract A method based on digital micro-mirror device (DMD) as a SLM modulates an area array CCD is proposed. It is used to solve the information crossing caused by over exposed or under exposed, when shooting high-contrast scenes by general CCD camera. A CCD is mapped as multi-districts and is destined for multi-times exposed through a pre-image. A CCD is able to be exposed partly as using a DMD. A data structure is designed for enhancing dynamic range of image from CCD. Experiments show that this method improves the photo quality, and shows information in high lights or shadows clearly. It also enhances the dynamic range of image data. The high quality photo and its high dynamic range data are obtained real-time without the software fuse many different exposure images.

Key words image processing; imaging system; digital micro-mirror device; high dynamic range image; area array CCD

1 引 言

图像传感器在工业检测、医疗诊断、军事探测、航天航空等领域都有着广泛应用。为了获取高质量图像,面阵 CCD 作为首选的探测元件。CCD 中的势阱用于存储光生电荷,其半导体的结构决定了自身的动态范围(DR),一般在 72 dB 以下。势阱深度直接影响图像动态范围。选择一款高动态范围的 CCD,不乏是一种选择,势必提高投入成本,况且高端的高动态范围 CCD 器件尚处于研发试制阶段,有待时间的验证和商品化。目前,被图像处理学界所

热衷探讨的话题是如何运用图像处理软件,从低动态范围图像(LDRI)中获取理想的高动态范围图像(HDRI)。有关此专题的论文举不胜数。有 Robertson 等^[1]从噪声分布的概率统计角度来解决扩展动态范围获取 HDRI 的问题。Mann 等^[2]利用一个可信度函数,对场景估计出可信度,然后用多幅不同的曝光照片加权平均得到 HDRI。Debevec 等^[3]提出一种确定相机响应曲线的算法,并对多曝光图像加权平均得到高动态范围图像。Madden^[4]提出了 CCD 的直接输出图像的动态范围扩展方法,

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国家 863 计划(2007AAA12Z103)资助课题。

作者简介: 周 望(1958—),男,高级工程师,主要从事光机电一体化和微弱光检测等方面的研究。

E-mail: wang58@suda.edu.cn

高动态范围图像的信息主要取决于未饱和的最大曝光图像。还有采取直接对多曝光图像进行融合,得到明暗细节都清晰的照片。Goshtasby^[5]对图像分块,按照信息熵的原则,合并含信息量最大的曝光图像块包。Szeliski^[6]先对多幅曝光图像的同位置像素求平均,而后利用直方图均衡的方法将平均图像映射到新的强度上实现图像对比度的增强。归纳其中主要处理的方法都是通过多幅不同曝光的图像,以各种相关的融合技术来提高原有图片的动态范围,提高和改善了原有图片的视觉效果。具体地讲,原图中过曝光部分或欠曝光部分有了改善,原模糊的细节经过处理可以清晰地观察到了。

2 图像的动态范围

图像的动态范围(DR)是指图像中最亮点的亮度值 I_{\max} 与最暗点的亮度值 I_{\min} 之比,即

$$a = I_{\max} / I_{\min}. \quad (1)$$

然而,通过普通 CRT 监视器中的像元用一个字节(8 bit)表示灰度值,它是一个用整数表示的范围(0~255),只能表示 256 级灰阶,也就是说:用最大值 255 比上最小值 1(分母不能为 0),CRT 监视器只能显示图像的动态范围为 255。因此,用 CRT 监视器显示图像,其动态范围被限定在 $a_{\max} \leq 255$ 范围内。目前,通过图像融合算法处理,再现出的图像视觉感官会有很大改观,特别是图像中原先过曝光或欠曝光的局部动态范围得到了提高,原来模糊的细节变得清晰了,一些细节得以再现。但是,严格来讲融合处理对图像局部 DR 的增强并不代表整幅图像的 DR 提高。

要提高 CCD 成像的动态范围应该有二层面的意义:首先是改善图像的视觉效果,希望无论场景如何,图像的高亮处或是昏暗处都能展现其细节;其二,成像目的不仅仅是观看图像,更重要是通过面阵 CCD 获取高动态范围的图像数据。即 CCD 视频信号经过模/数转换后输出的图像数据。或许认为提高 ADC 器件的转换精度就可提高图像的动态范围,视频 ADC 通常是选用 12 bit,高的有 14 bit。这样做固然可以提高一些图像 DR(I_{\max}/I_{\min}),视觉效果远远不够理想。实验发现,即使把 12 bit ADC 改为 14 bit,所获图像还是会出现“发白”或“黑暗”的局部,视觉效果并不满意。

要从面阵 CCD 的成像原理开始分析。当光学成像透镜对准某一场景,经过透镜后在焦平面形成实像,此刻将面阵 CCD 置于该焦平面上,这就形成了电子照相机成像的锥形结构。投射在 CCD 光敏

元件上的光能被转化成电荷,由 CCD 上的势阱收集。电荷的多少和投射在 CCD 上的光强有关,与 CCD 的光谱响应特性有关,与照射的时间有关,可以用下列公式表示

$$I_{i,j} = S_{\lambda} \times E_{i,j} \times \Delta t, \quad (2)$$

式中 $I_{i,j}$ 表示 CCD 中某个 $E_{i,j}$ 感光元在 λ 波长、光强为 $E_{i,j}$ 的光照下,照射 Δt 的时间片段, S_{λ} 是视 CCD 光谱响应特性而定, $E_{i,j}$ 取决于所对应的场景的光照度, Δt 可以通过快门装置人为进行控制。 Δt 越长, $I_{i,j}$ 就越大。 $E_{i,j}$ 越强, $I_{i,j}$ 就越大。当 $E_{i,j}$ 或 Δt 大到一定值后, CCD 承载光生电荷的势阱已经无法再承载更多的电荷,产生饱和后溢出。

普通数码相机有 $i \times j$ 个感光元在同一个 Δt 时间中被感光,由于 S_{λ} 和 $E_{i,j}$ 随场景中位置的不同, $I_{i,j}$ 的值不同。拍摄时,先要在取景窗中选一个或多个点进行测光,用测光的平均值作为正式曝光的时间参数 Δt 。这样一来,面阵 CCD 上的所有 $i \times j$ 个感光元都只能以同一个 Δt 曝光,问题在于那些 S_{λ} 和 $E_{i,j}$ 值大于测光点平均值的部分会出现过曝光,饱和成一片“白色”。反之,那些小于平均值的部分欠曝光是“灰暗”的。势阱饱和是造成图像亮斑处细节模糊不清的根本原因。实验结果证明,适当缩短曝光时间 Δt ,可使原先过曝光的区域变得清晰,但是原先清晰的区域反倒变得灰暗不清。经研究设计,采用了面阵 CCD 的感光元分区域按不同的曝光时间 Δt 完成曝光的方法,解决普通照相机拍摄中上述普遍存在的缺陷。该设计方案如图 1 所示,在成像透镜与面阵 CCD 之间,嵌入数字微镜器件(DMD)作为空间光调制器(SLM)起到调制成像光路的作用,面阵 CCD 以预先设定多个的区(块),按不同的曝光参数曝光,面阵 CCD 视频信号流经过 ADC 转换输出,组成高动态范围图像及其数据。与上述方案配合提出了一种包含高动态范围图像信息的文件结构。既能各区(块)明暗再现适中,图像细节丰富,又能够实际反映高动态范围图像的数据。

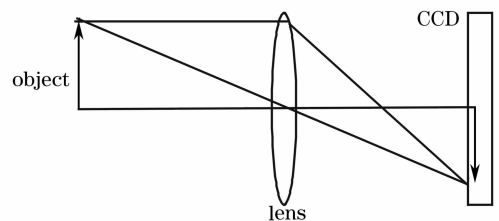


图 1 电子照相机成像光路

Fig. 1 Image light path of a digital camera

3 DMD 的工作原理

本方案所采用的 DMD 器件是美国德州仪器公司(Texas Instrument)开发的专利产品。该技术核心是:通过数字信息控制数十万到上百万个微小的反射镜,每一块微反射镜都能受控于某逻辑状态,将光线按既定方向投射。每个微镜的面积只有 $16\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$,微镜按矩阵行列排布,每个微镜可在二进制 0/1 数字信号的控制下做 $\pm 12^\circ$ 角度翻转。假设 $+12^\circ$ 为有效位置,微镜将光线投向目标,反则 -12° 为无效位置,微镜使光线达不到目标。图 2 为数字微镜的折光示意图,图 3 为数字微镜单元结构解析。

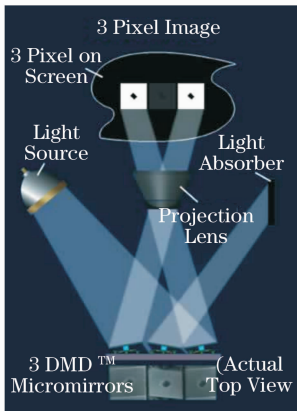


图 2 数字微镜的折光示意图

Fig. 2 Refraction principle of a digital micro-mirror

因此,用一位 0/1 二进制位控制每个微镜的翻转状态,甚至利用 8 位脉冲宽度调变可以得到 256 级灰阶效果。采用一位二进制位控制模式其最高帧速可达 8000 frame/s,微镜光谱反射率(420~700 nm)高达 89.4%^[7]。DMD 的最高帧速及其光谱响应特性足以满足对面阵 CCD 成像光路的调制。这种技术也称为“数字光线处理技术”(DLP)。

目前,DMD 主要用于商用 DLP 投影机 and 背投电视,由于近年来 DLP 背投电视的市场迅速扩大,使得其发货量激增。由 TI 独家开发的 DMD 芯片每年的发货数量已达到 800 万片以上。图 4 为



图 5 三种不同曝光时间的图片

Fig. 5 Three images with different expose time

DMD 器件的实物图片。

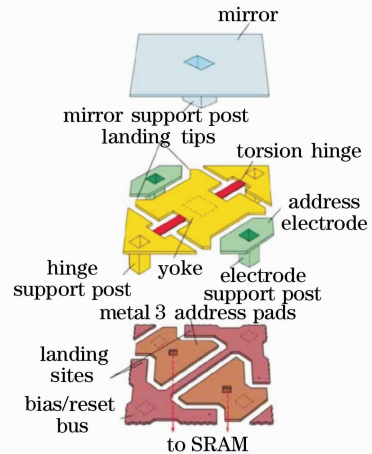


图 3 数字微镜单元结构解析

Fig. 3 Analysis to structure of a unit in digital micro-mirror

This data sheet is a product preview data sheet for the 0.7XGA 12° DDR DMD Discovery™

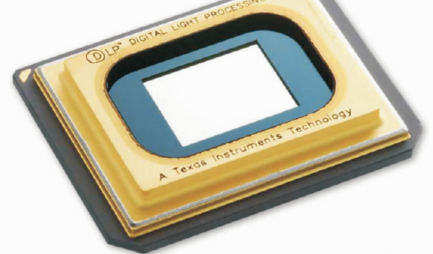


图 4 DMD 数字微镜器件实物图片

Fig. 4 Picture of a digital micro-mirror device

4 成像光路结构设计

图 5 是一组用普通数码相机同一场景用三种不同的曝光时间所拍摄的图像效果。它们的视觉感官明显存在差异,暗处细节清晰了,亮处就饱和;亮处细节清晰了,暗处漆黑一团。

对图 5(a)~图 5(c)进行分析,场景可以分为三个层面,近处的棕榈树叶、稍远的香樟树和远处的楼房,三个层面的最佳曝光时间分别为 $1/160\ \text{s}$, $1/320\ \text{s}$, $1/640\ \text{s}$ 。那么,要用传统相机实现按区

(块)分不同时间曝光是不可能的。

DMD 器件作为本设计的关键器件,从光学成像原理上, DMD 作为一种受控于数字信号处理器(DSP)的空间光调制器。为了实现设计目的,将原先的数码相机(图 1 所示)的成像光路改设计成图 6 所示的结构形式。

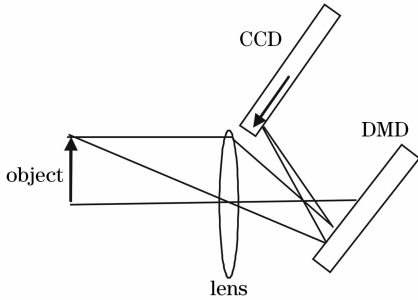


图 6 基于 DMD 的高动态成像照相机光路
Fig. 6 Image light path of a HDR camera base on DMD

在原先成像光路中插入 DMD 芯片,作为空间光调制器,只有那些经过 DMD 调制有效光线才能到达 CCD 接收面,被转化成电信号。反之,无效光线到达不了 CCD 接收面,被忽略。DMD 对应于场景的区域和转换时刻取决于 DSP 对其的控制,同时 CCD 的曝光时间(感光积分时间)需配合 DMD 的动作,CCD 的曝光时间要大于 DMD 转换工作的全程时间。CCD 的曝光受控于快门,快门又分为机械快门和电子快门,电子快门(电子曝光)是一种先进、寿命长、高效的电控技术,已被普遍应用于 CCD 相机。电子曝光的工作原理:在曝光过程(光生电荷积累)之前,必须先将 CCD 势阱中的原先残余电荷泄放掉,然后在曝光时段积累电荷,在 CCD 势阱中形成与场景对应的电荷包。在帧、行、像元的同步驱动脉冲的控制下,CCD 的视频电信号(模拟信号)以串连序列的形式输出。后续处理过程这里不再赘述,请参考相关技术文献。

5 HDRI 成像原理

在图 6 设计的基础上,图 7 显示了基于 DMD 技术的高动态范围面阵式 CCD 相机的电子学系统模架。它是以 DSP 为信息处理中心,配置了 FPGA 器件作为时序脉冲发生器,图中 SW 作为预测成像与 HDRI 成像的转换开关。

获取 HDRI 的控制流程:首先将 SW 视频转换开关位于预成像位置,在 DSP 监控之下,DMD 将所有成像光线全部投射到面阵 CCD 的成像面上,取得

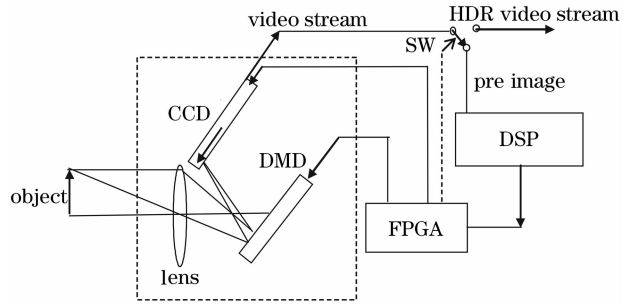


图 7 HDR Camera 电子学系统设计
Fig. 7 Electronics structure system design for a HDR camera

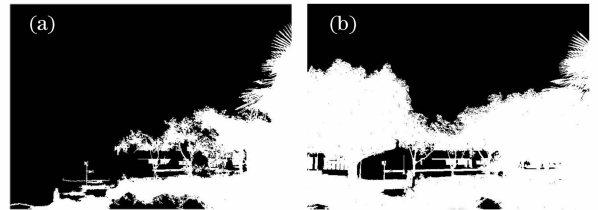


图 8 DMD 的分区曝光控制

Fig. 8 Controlling expose partly to DMD

一幅预成像图像,其曝光时间无须严格给定,如以图 5(b)为样本,曝光时间是 1/320 s,将近处的棕榈树叶、稍远的香樟树和远处的楼房分别定义为 a, b, c 三个曝光区域(为方便介绍仅分三个区块),并以各自区域的平均灰度值和实时动态范围为依据,确定相应的曝光量。例如 a, b, c 三区域的曝光时间可分别定为 1/160 s, 1/320 s, 1/640 s。然后,将 SW 投向 HDR video stream 端, DSP 通过 FPGA 控制 DMD 依次产生图 8(a),图 8(b)所示分区曝光的控制效果,图像中白色的区域为 DMD 在相应时段中有效投射区,可以看出有效投射区是一片边界任意封闭曲线的区域。最后以 c 区 1/640 s 曝光,此刻 DMD 为整幅有效投射,CCD 为全帧曝光。图 9 为 CCD 与 DMD 相关联的时序控制图。DSP 控制 CCD 完成一次电子曝光时序后,将输出一帧经 ADC 转换的视频序列数据,实现了一幅 HDRI 的拍摄。此刻所获得的图像在 a, b, c 三个区域局部动态范围都有很好的表现。体现为棕榈树叶、香樟树叶

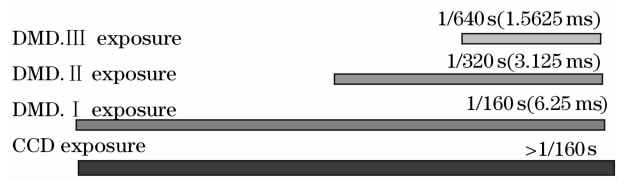


图 9 CCD 与 DMD 的曝光控制时序

Fig. 9 Time sequence of controlling expose to CCD and DMD

和楼房中的窗框等细节能在一张图片上同时清晰显示。图 10 所示为本文设计方法获得的视觉效果图像。



图 10 基于 DMD 技术的 HDRI

Fig. 10 HDRI base on DMD technique

整个拍摄流程均在 DSP 程序的监控之下。首先用边缘处理软件从预成像数据中计算出三个区域的封闭边界,如图 8(a),图 8(b)所示。图像边缘处理技术已经有多种成熟软件可借鉴。其次,可在已确定的封闭区域中求得其灰度的平均值、动态范围。在每个分区中,当平均值大而动态范围小时,说明处在高光区,平均值大于某上限阈值可认为是过曝光,DMD 中对应微镜的有效投射时间要减少;反之,平均值小且动态范围小则说明是弱光区,其平均值小于某下限阈值则可认为是欠曝光,DMD 中相对应微镜有效投射时间延长。对于中间值可建立一个索引表引用。

为有效地保存 HDRI 的原始数据,需要创建一种含曝光当量的图像文件格式,图像中每个像元除了一个字节表示灰度值,再增加一个字节表示该像素的曝光当量值,该值与像元所在区域的曝光量相关。曝光时间越长,当量值越小。并以全幅图像中曝光时间最长的区域为基值 1,以线性比例方式求得各区域的曝光当量。例如:全幅图像中曝光时间最长的时间为 10 ms,某区域的曝光时间为 2 ms,所得到该区域的曝光当量为 $10 \text{ ms}/2 \text{ ms}=5$ 。

通过对图像数据的扩充,图像的实际动态范围得到提高。仍以图 5 为例,灰度的取值范围为 $0\sim 255$ (8 位),表 1 计算得到各区的曝光当量值。各区曝光时间设定恰当,各区均能获得最大的动态范围。在高动态范围图像中,除了图像表现内容丰富,其图像数据更包含了可高动态的数据。在 a 区,最小的灰度值 I_{\min} 等于 1(分母不为 0),而 c 区是曝光时间最短的,但是最大灰度值可达 255。那么高动态范围图像的实际动态范围应该能计算得到

$$a = I_{\max} \times E_c / I_{\min} = 255 \times 4 / 1 = 1020,$$

式中 E_c 为 c 区的曝光当量。同样是 8 位宽度的视频数据,用本文设计方法和图像数据结构可提高图像动态范围 4 倍。假如视频数据宽度为 12 位,图像动态范围也同样提高 4 倍。实际上取决于拍摄中最大曝光时间与最小曝光时间的比值。

表 1 各区的当量值列表

Table 1 Each equivalent list table

Location area	Exposure time	Exposure equivalent (image)
a	1/160 s(6.26 ms)	1
b	1/320 s(3.125 ms)	2
c	1/640 s(1.5625 ms)	4

6 结 论

提出一种基于 DMD 技术增强面阵 CCD 动态范围的方法,主要成像步骤为:1)对目标场景获取一幅预成像图像;2)对预图像按平均灰度和局部动态范围作边界分区,设定各区的相应曝光时间;3)按确定参数逐区控制 DMD 微镜转换工作位置,同时 CCD 完成一次电子曝光的积分成像过程;4) CCD 输出一帧视频信号,与图像的曝光当量结合,除了可以获得一幅具有高动态范围图像之外,还可以获取到一组图像文件格式的相关数据。实验证明了该方法实时性强、图像保真度高,所获图像整体得到增强,高亮与阴暗处的细节均能很好地呈现,明暗对比层次丰富且整体效果比较自然、真实,便于人眼观察识别,更有助于计算机视觉系统中其他算法研究。与软件处理方法相比,更保全了原场景的真实性。

参 考 文 献

- Robertson M A, Borman S, Stevenson R L. Estimation-theoretic approach to dynamic range enhancement using multiple exposures [J]. *J. Electron. Imaging*, 2003, **12**(2): 219~228
- Mann S, Picard R W. On being 'un digital' with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed pictures [C]. Proceedings of IS & T's 48th Annual Conference. Washington DC: Society for Imaging Science and Technology, 1995. 422~428
- Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C]. SIGGRAPH 97 Conference Proceedings. New York: ACM, 1997. 369~378
- Madden B C. Extended intensity range imaging[R]. MS-C-IS-93-96, Pennsylvania: GRASP Laboratory of University of Pennsylvania, 1993
- Goshtasby A A. Fusion of multi-exposure images[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, **23**(6): 611~618
- Szeliski R. System and process for improving the uniformity of the exposure and tone of a digital image[P]. US: 6687400, 2004-02-03
- Product Preview Data Sheet. Texas Instruments TI DN 2503686, 2004. 11~12