

## 基于 DMD 的红外景象投射器灰度调制与同步技术

许家林,李丙玉,刘 阳,隋 龙,王晓东

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

**摘 要:** 基于数字微镜(DMD)的红外场景投射器可以被应用于场景仿真系统中。论述了应用于红外仿真系统的 DMD 显示灰度图像的原理和对应的 DMD 的工作时序,并且设计了基于 TI 的 0.7XGA 芯片组的红外场景投射器。该设计支持外部同步触发,投射图像是灰度级是 8 位,并且投射图像的帧频大于 250 Hz。仿真系统中的热像仪和投射器的同步将影响采集的结果,分析了热像仪的积分时间包含、超前和滞后于投射器播放时间对系统采集到的图案灰度产生影响,论证了严格同步在红外仿真系统中的必要性,并通过实验数据进一步证明了分析的结果。

**关键词:** DMD; 场景投射器; 灰度图像显示; 同步

中图分类号: TN215 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)04-1062-06

## Gray scale modulation and synchronization of infrared scene projector based on DMD

Xu Jialin, Li Bingyu, Liu Yang, Sui Long, Wang Xiaodong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The Dynamic Infrared Scene Projector based on Digital Micromirror Device (DMD) can be used in Scene Simulation System. The principle of displaying grayscale images on DMD which used in Scene Simulation System and its driving timing were discussed in this paper. An infrared scene projector based on 0.7XGA DMD chipset of Texas Instruments was designed. This projector can be synchronized by external trigger signal, and its max frame rate is greater than 250 Hz while the image mode is 8 bits of grayscale resolution. The synchronization between the projector and the image sampling equipment (Infrared Thermal Imager) has great influence on the sampled result. 3 kinds of synchronization relationship, including the projecting phase leading, equal to and lagging the image sampling system, were analyzed to illustrate the influence of the synchronization relationship between the projector and the image sampling equipment. Experiments show the results in detail.

**Key words:** DMD; scene projector; gray scale display; synchronization

## 0 引言

DMD 作为空间光调制器已经被广泛应用在投影仪中,在光刻机、光谱仪等设备中也已成功应用。随着 DMD 翻转帧频的提高和驱动数据总线的带宽的提高,DMD 显示灰度图像的帧频也在提高。这使得 DMD 在红外仿真领域作为红外场景投射器的关键器件成为了可能。

美国的光学科学公司(Optical Sciences Corporation)从 2001 年开始一直研究基于 DMD 的动态场景投射系统,2008 年制作了基于 DMD 动态红外场景投射器,该设备支持外部同步,使得探测器的积分时间包含每一帧图像的播放时间<sup>[1]</sup>。

在国内,哈尔滨工业大学的康为民等人进行了数字微镜阵列红外动态景象模拟器的研制,并且描述了其中的关键技术<sup>[2]</sup>;上海技术与物理研究所、西安应用光学研究所对基于 DMD 的红外景象投射器进行了相关的光学设计与分析<sup>[3-4]</sup>。西北工业大学张凯等人分析了 DMD 系统的硬件,并且成功使用德州仪器公司(TI)的 D4100 系列实现了灰度图像的显示,并且帧频范围是 10~100 Hz<sup>[5-10]</sup>。

国内基于 DMD 的投射器进展较慢的重要原因是:TI 公司的 DMD 驱动芯片组资料中,只有驱动 DMD 显示二值图像的时序,没有驱动 DMD 显示灰度图像的时序,国内只能通过现有的能够显示灰度图像的驱动器来实现灰度图案显示。在这些现有的驱动器中,一种是在投影仪中广泛使用的 DLP100 系列套件,还有一种是 TI 公司的第三方合作伙伴推出的 Lighter Commander 系列套件。它们都能够显示灰度图像,但是这些驱动器的数据接口和显示帧频都不能满足稳定高帧频高灰度级图像的显示要求,特别是这些固定架构的驱动器不能满足外部高精度同步触发的要求。红外仿真系统中,使用的热像仪的积分时间通常较短,常用的积分时间是 4~5 ms,这要求驱动器播放的一帧图像的时间小于 4~5 ms,即要求仿真器播放图像的帧频达到 200 Hz 以上。同时,热像仪与播放器的同步对红外仿真系统非常重要。

文中直接以 TI 的 DMD 芯片组中的 0.7 inch (1 inch=2.54 cm)1 027×768 像素 DMD 为基础,研制了红外场景投射器的驱动器,显示 8 位灰度的帧频

大于 250 Hz。文中说明了使用 DMD 显示灰度图像的方法,并且以实验数据验证了驱动器播放灰度图像和采集系统采集灰度图像的严格同步的重要性,以及同步对采集到的灰度值的影响。

## 1 DMD 灰度图像显示方法

假设全亮的灰度值为 100%,全暗的灰度值为 0%,使用脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)的方法,在固定的时间  $t_p$  内,有  $t_{on}$  和  $t_{off}$  时间组成:

$$t_p = t_{on} + t_{off} \quad (1)$$

在  $t_{on}$  的时间里,图像显示全亮,在  $t_{off}$  的时间里图像显示全暗,如图 1 所示。

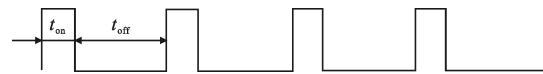


图 1 脉宽调制定义

Fig.1 PWM definition

这样在  $t_p$  时间里,可以得到一个平均灰度值为:

$$\text{Gray} = \frac{t_{on}}{t_p} \quad (2)$$

单个像素在实现一次灰度级别时,只需要在开始时刻将微镜置 1 状态, $t_{on}$  时刻将微镜置 0 状态,即可在时间  $t_p$  内获得平均灰度。为了实现灰度级别为 256, $t_{on}$  可以由 255 个不同的占空比,范围是 0/255~255/255。对应的微镜翻转的时刻有 255 种。

对于像素点数 1 024×768 这样的微镜阵列,在时间  $t_p$  内使得每个像素点都获得不一样的灰度值,这样在 255 个可能的时间位置,微镜都可能翻转,而所有的微镜分为 16 个块,每个块的大小为 1 024×48。更新数据时,首先使用 32 位数据总线同步方式 DDR 的时序将数据载入 DMD 对应的 RAM 单元,然后使用 Reset 命令将新的数据在微镜上显示出来。数据载入命令一次最少载入一行数据,Reset 命令一次只能复位 48 行,即一个块。

假设在显示灰度图案时,一行 1 024 像素中有 256 个不同的灰度值,那么这个数据按照脉宽调制的方法需要更新 256 次数据,并且复位 256 次。

如果将灰度值的大小按照 8 位二进制的方式重新排列,8 位二进制表示为:

$$N = b_0 \times 2^0 + b_1 \times 2^1 + b_2 \times 2^2 + b_3 \times 2^3 + b_4 \times 2^4 + b_5 \times 2^5 + b_6 \times 2^6 + b_7 \times 2^7 \quad (3)$$

$b_0$  到  $b_7$  为对应的二进制值,数值是 0 或 1,如果按照位的权重, $b_0$  显示的时间为  $t_0$ , $b_n$  显示的时间为  $2^n \times t_0$ ,这样来实现 256 灰度级。

这种方法的好处在于 DMD 的数据只需要载入 8 次数据,就可以实现 256 级灰度值。具体实现时,时序上可以将最低放在前,也可以把最高位放在前面,如图 2、图 3 所示。

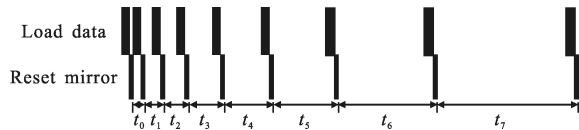


图 2 灰度图像的时序(最低位在前)

Fig.2 Timing of grayscale image (LSB is the first)

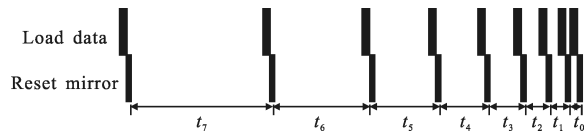


图 3 灰度图像的时序(最低位在后)

Fig.3 Timing of grayscale image (LSB lags behind)

文中采用的是最高位在前的方法,完成一帧 8 位灰度图像的时间小于 4.0 ms,最高帧频大于 250 Hz。

### 2 投射器的硬件实现

文中使用 TI 的 DLP 系列芯片组 0.7XGA 来实现。使用该芯片组构成的硬件结构如图 4 所示。

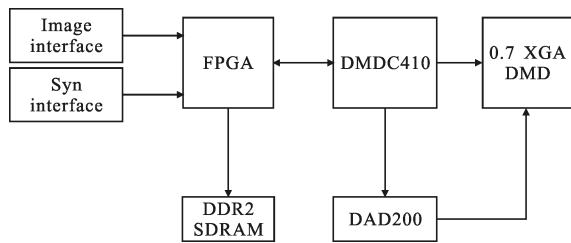


图 4 投射器硬件组成框图

Fig.4 Block diagram of projector hardware

其中,DLPC410、DLP7000 DMD、DLPA200 是 TI 提供的 DLP 系列芯片组。DLPC410 主要功能是 DMD 数据的驱动和控制,DLP7000 DMD 用来显示图像,DLPA200 主要的功能是微镜状态寄存器数据更新到微镜上。FPGA 是驱动和控制核心,主要实现的功能包括:图像源数据的接收和缓存,图像数据的编码,同步信号的接收、图像数据的发送等。

### 3 灰度级验证及同步对灰度级的影响

为了验证系统具有 256 级灰度,以及同步对采

集系统灰度的影响,文中设计了如下实验。

系统包括:图像源生成器,DMD 驱动器,温控黑体,光学系统,中波红外热像仪,Camera Link 图像采集卡,计算机等,连接关系如图 5 所示。

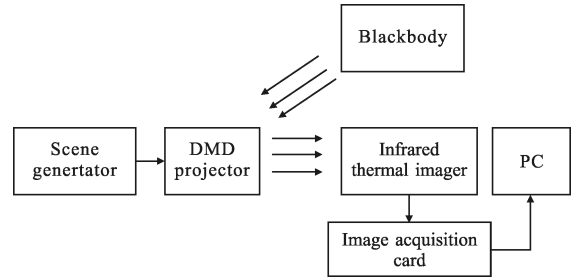


图 5 系统结构图

Fig.5 System structure

图像源使用纯色灰度图案,灰度值从 0~255 依次增加。使用红外摄像机来采集投射出来的场景图像。热像仪的灰度级为 16 位,而投射器的图像灰度为 8 位。热像仪的积分时间设置为 4 ms,采集频率为固定的 50 Hz。将采集到的图像数据通过 Camera Link 接口使用图像采集卡传输到 PC 机上进行分析。

图 6 中 1 是驱动板,2 是 DMD,3 是温控黑体,4 是光学系统透镜,5 是热像仪,6 是 PC。

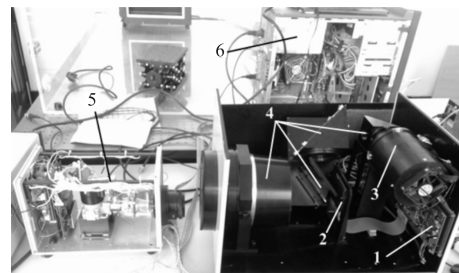


图 6 实验图

Fig.6 Experiment picture

系统图播放一帧图像的时间为 3.92 ms,积分时间比播放时间大 0.08 ms。调整同步参数,使得播放时间相位严格包含播放时间,如图 7 所示。

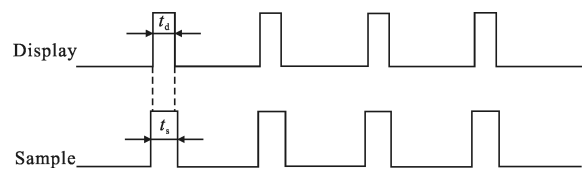


图 7 采样时间包络显示时间

Fig.7 Sampling time includes displaying time

横坐标为播放的灰度值,纵坐标为热像仪采集

到的灰度值,如图 8 所示。

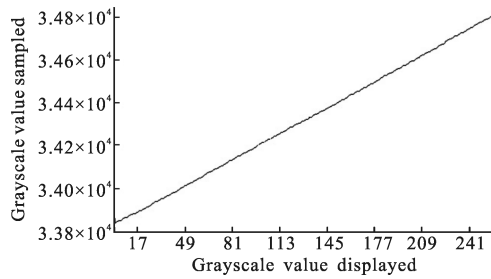


图 8 播放图像的灰度和采集到的图像灰度

Fig.8 Grayscale value (displayed vs sampled)

为了看清楚细节,取其中的第100 到第 164 点数据,重新作图如图 9 所示。

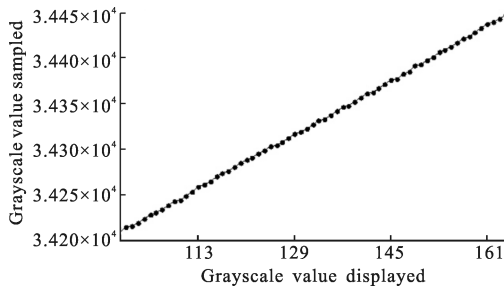


图 9 灰度值细节

Fig.9 Grayscale value in detail

可以看出,随着投射器图像源灰度值的增加,热像仪采集到的图像的灰度在线性增加。证明了投射器播放具有 8 位灰度级,并且能够和采集系统配合,采集到了灰度信息没有损失。

重新调整投射器的同步参数,使播放灰度图像的时间位超采集时间 0.12 ms,如图 10 所示。

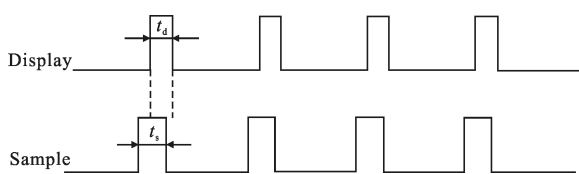


图 10 采样时间超前显示时间

Fig.10 Sampling time is before displaying time

此条件下,最高位的显示时间不被完全包络在采集时间里;在显示时序上,灰度值为 0~127 的图像最高位为 0,在前一半时间里不受影响,而是灰度值为 128~255 的图像,最高位为 1,这高位由于只被部分采集,所以这些图像的灰度值整体偏小。将采集到

的数据绘图如图 11 所示。

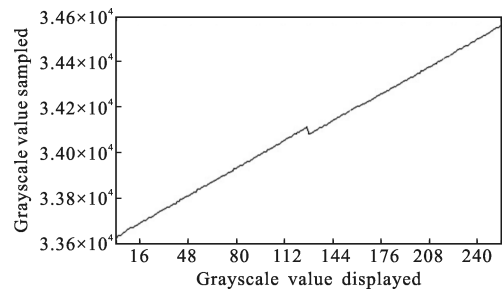


图 11 播放图像的灰度和采集到的图像灰度

Fig.11 Grayscale value (displayed vs sampled)

在图中抽取第 100 点到第 164 点,重新作图如图 12 所示。

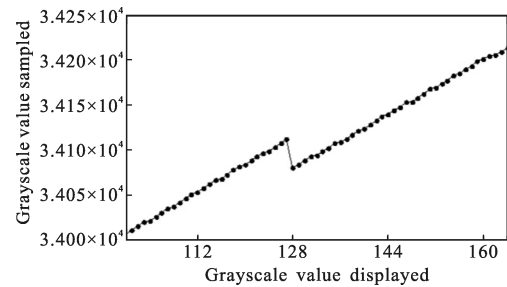


图 12 灰度值细节

Fig.12 Grayscale value in detail

可以看出,灰度值大于等于 128 的图像的被采集到的灰度值整体减小了一部分。在第 128 点处出现了一个跳跃,和理论分析结果一致。

重新调整同步参数,使得播放图像的时间滞后于采集图像的时间,如图 13 所示。

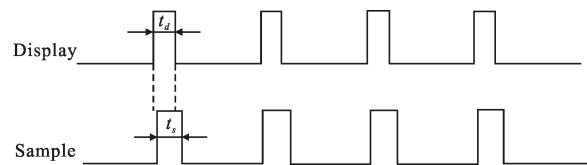


图 13 采样时间滞后显示时间

Fig.13 Sampling time lags behind displaying time

这样,8 位灰度的低几位的显示时间不被包络在采集时间里,这样采集到的图像的灰度的分辨率将降低,当最低位的时间恰好不被包络时,8 位灰度将变为 7 位灰度,当最低两个位恰好不被包络时,8 位灰度将变成 6 为灰度,以此类推。当某一位的时间只有一部分不被包络在采集时间中时,这一位的线性

度也会降低。

图 14 是当最低位显示时间不被包括在采集时间中的时候采集到灰度线性。

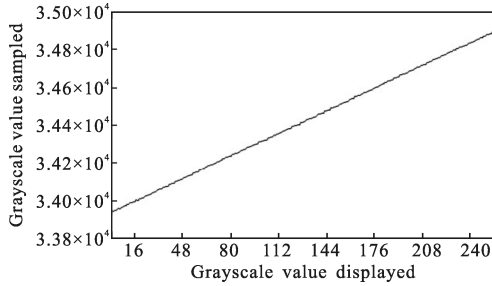


图 14 播放图像的灰度和采集到的图像灰度  
Fig.14 Grayscale value (displayed vs sampled)

从整体上看,灰度的线性很好,但是局部放大之后,取第 100~132 灰度点作图如图 15 所示。

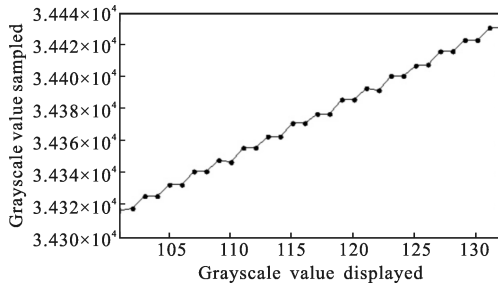


图 15 灰度值细节  
Fig.15 Grayscale value in detail

从图上可以发现,原本 256 灰度级只剩下 128 灰度级了,原本 8 位的灰度只剩下 7 位有效的灰度信息了。

再调整同步参数,使播放图像灰度的第 8 位和第 7 位的部分显示时间不被采集,此时热像仪采集到的图像的灰度值如图 16 所示。

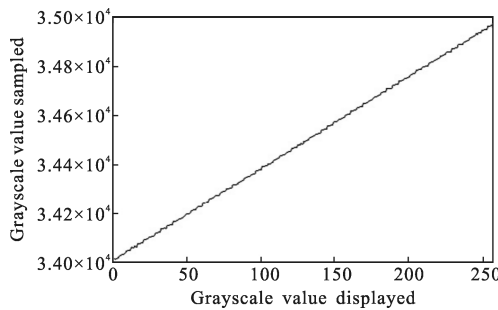


图 16 播放图像的灰度和采集到的图像灰度  
Fig.16 Grayscale value (displayed vs sampled)

从图中已经可以看出阶梯状的灰度缺失。抽取第 100~164 重新作图,如图 17 所示。

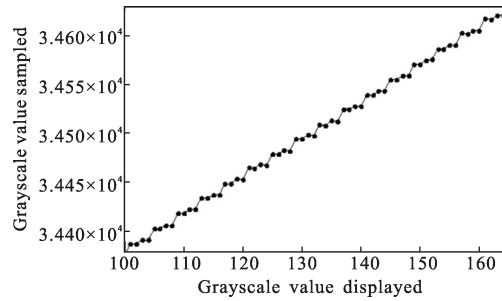


图 17 灰度值细节  
Fig.17 Grayscale value in detail

可以看到,每 4 个点的灰度值近似相等,其中前两个点和后两个点的灰度值略有不同,后两个点包含了第 7 位灰度值的部分信息。

### 4 结论

文中设计的基于 DMD 的高帧频灰度图像投射器能够无损失地播放 8 位灰度图像,并且能够与采集设备同步,能够使得采集系统无损失地采集播放的灰度图像。同时,文中论述了图像采集设备与投射器之间同步对采集到的图像的影响。

### 参考文献:

- [1] Beasley D Brett, Matt Bender, Jay Crosby, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [C]//SPIE, 2009, 7210: 72100I.
- [2] Kang Weimin, Li Yanbin, Gao Weizhi. Dynamic IR scene projector using a digital micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 753-756. (in Chinese) 康为民, 李延彬, 高伟志. 数字微镜阵列红外动态景象模拟器的研制[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 753-756.
- [3] Jian Yi, Pan Zhaoxin. A field lens design of illumination and projection optics for dynamic infrared scene generator based on DMD[C]//SPIE, 2012, 8418: 84180N.
- [4] Hu Yu, Gao Jiaobo, Wang Jun, et al. Study of dynamic infrared scene projection technology based on Digital Micro-mirror Device(DMD) [C]//SPIE, 2007, 6835: 68350T.
- [5] Liang Yong, Zhao Xiaobei, Ma Jun, et al. Design of infrared scene simulator hardware system based on DMD[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(12): 683-686. (in Chinese)

- 梁勇, 赵晓蓓, 马骏, 等. 基于DMD的红外场景仿真器硬件系统设计[J]. 红外技术, 2011, 33(12): 683-686.
- [6] Li Shaoyi, Ma Jun, Liang Zhiyi, et al. Design and implementation of driving and controlling system based on DMD [J]. *Measuremet & Control Technology*, 2011, 30(4): 51-54. (in Chinese)
- 李少毅, 马骏, 梁志毅, 等. 基于DMD的驱动控制系统设计与实现[J]. 测控技术, 2011, 30(4): 51-54.
- [7] Zhang Kai, Huang Yong, Sun Li, et al. Dynamic infrared scene simulation using grayscale modulation imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (9): 2283-2287. (in Chinese)
- 张凯, 黄勇, 孙力, 等. 动态红外场景仿真的灰度调制成像技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2283-2287.
- [8] Zhang Kai, Sun Li, Yan Jie. Design and test of IR scene simulator based on the DMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 369-372. (in Chinese)
- 张凯, 孙力, 闫杰. 基于DMD的红外场景仿真器设计及测试[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 369-372.
- [9] Zhang Kai, Sun Siliang. Design of infrared dynamic scene target simulator system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 12-16. (in Chinese)
- 张凯, 孙嗣良. 红外动态场景目标模拟器系统设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 12-16.