

doi:10.3788/gzxb20154408.0811001

# 基于 DMD 的高动态范围场景成像技术

何舒文<sup>1,2</sup>, 王延杰<sup>1</sup>, 孙宏海<sup>1</sup>, 张雷<sup>1,2</sup>, 吴培<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为了对高动态范围场景进行实时有效的观测, 设计了一种采用数字微镜器件作为空间光调制器的成像系统. 通过改进数字微镜器件的驱动时序, 提高数字微镜扩展成像系统动态范围能力. 针对光学系统存在畸变, 采用多项式拟合法获得数字微镜器件到图像传感器的精确映射关系. 针对一般调光算法导致调光后图像可视性差的问题, 引入色阶映射算子生成调光模板, 获得符合人眼视觉特性的调光结果. 实验结果表明, 在 10 帧/s 的条件下采用数字微镜器件可提高传统成像系统动态范围 66 dB, 成像系统总的动态范围达到 126 dB, 图像传感器控制准确度达到 0.69 个像素级别, 调光后场景高亮目标与暗背景可同时观测到, 调光后采集图像的信息熵得到提高, 系统满足对高动态范围场景实时成像观测的需求.

**关键词:** 光学成像; 数字微镜器件; 高动态范围; 像素级调光; 色阶映射算子; 图像熵

**中图分类号:** TN27 ; TN29

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2015)08-0811001-7

## High Dynamic Range Imaging Based on DMD

HE Shu-wen<sup>1,2</sup>, WANG Yan-jie<sup>1</sup>, SUN Hong-hai<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, WU Pei<sup>1,2</sup>

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

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to observe high dynamic scene effectively and in real time, an imaging system based on digital micromirror device as a spatial light modulator was designed. The capability of digital micromirror device was improved in increasing the dynamic range of imaging system by improving the driving timing of digital micromirror device. To tackle the distortion error of the optical system, polynomial fitting was employed to acquire the mapping relationship between digital micromirror device and imaging sensor. Finally, in order to resolve the problem of poor visibility when using ordinary light adjusting algorithm, tone mapping operator was introduced to generate a light adjusting template and image with better visibility was acquired. The results indicate that the dynamic range of traditional imaging system can be increased by 66 dB under the condition of 10 frames per second and the total dynamic range of the imaging system reaches 126 dB. Moreover, the precision of using digital micromirror device to control imaging sensor is up to 0.69 pixel, bright part and dark part in a high dynamic range scene can be displayed simultaneously in one image after light adjusting and the entropy of image collected after light adjusting increased. The imaging system meet the requirement of real time observation in high dynamic range scene.

**Key words:** Imaging system; Digital micromirror device; High dynamic range; Pixel-level light adjusting; Tone mapping operator; Image entropy

**OCIS Codes:** 110.1080; 100.2980; 220.4830; 120.4640; 130.3990

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(No. 2014AA7031010B)资助

**第一作者:** 何舒文(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高动态场景成像. Email: 250071113@qq.com

**导师:** 王延杰(1963-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为实时图像处理. Email: wangyj@ciomp.ac.cn

**收稿日期:** 2015-04-22; **录用日期:** 2015-05-25

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

## 0 引言

为了准确获得高动态范围(High Dynamic Range, HDR)场景的亮度和对比度信息,要求成像系统具有观测场景更大的动态范围.普通的 CCD 相机或者 CMOS 相机动态范围不超过 48 dB,仅能满足一般需求,目前在科学研究领域所使用的科学级相机动态范围能够达到 70 dB 左右,通过硬件上的改进手段,如增大像元满阱或采用对数读出结构等,图像传感器动态范围可扩展到 100 dB 以上<sup>[1-4]</sup>,但是由此带来的是成本的急剧增加或事后恢复辐射强度误差较大等问题.而采用多次曝光进行软件合成处理获取高动态范围场景成像的方式存在耗时长,只能事后进行处理的缺点.

采用空间光调制扩展传统成像系统动态范围是目前高动态场景成像领域研究热点,主要采用的空间光调制器有液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD),硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCoS),数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)三种<sup>[5-8]</sup>.在国内外已有学者采用 LCD, LCoS 进行动态范围扩展实验并研制出样机,但是由于液晶类器件物理性质的限制,光能利用率低,调制后图像模糊,难以达到像素级别控制,动态范围提高一般不超过 42 dB<sup>[6]</sup>.DMD 作为一种新型的空间光调制器,与 LCD, LCoS 相比,具有输出图像信噪比高,画面质量稳定,定位精确,光能利用率高等优点<sup>[7]</sup>.目前已有学者利用 DMD 做调光控制的尝试,由于采用 DMD 原始的 8bit 位宽数据进行驱动控制,系统动态范围提高不超过 48 dB<sup>[5]</sup>,并且仅达到区域级的控制,调光后图像质量较差.

本文采用 DMD 做为核心空间光调制器件,研究了其扩展成像系统动态范围原理,通过设计其高数据位宽驱动方式将 DMD 扩展动态范围提高了 66 dB,系统总的动态范围达到 126 dB.针对实际光学系统存在畸变问题,采用多项式拟合获取 DMD 到图像传感器的映射关系,实验验证了 DMD 对图像传感器的调光位置,控制准确度达 0.69 像元.在此硬件平台上进行了像素级调光算法的研究,针对调光后图像可视性差的问题,引入色阶映射算子求解像素级调光模板,获取高动态范围场景的像素级调光结果,调光后图像质量得到改善,图像信息量得到显著提高.

## 1 DMD 的扩展系统动态范围原理

DMD 是一种用数字电压信号控制微镜单元执行机械转动来实现光学控制功能的装置<sup>[9,10]</sup>.通过往 DMD 控制器写入数字信号‘1’或者‘0’控制微镜执行正负 12°的翻转,使微镜处于“开”或者“关”状态,处于“开”状态的微镜能够将入射光反射至相机,形成亮点,而处于“关”状态的微镜将入射光反射至吸收装置,在

相机对应位置则表现为暗点.在相机固定曝光时间内,通过调节微镜所处于“开”状态的时间,对到达像素的光通量进行控制,实现灰度调制的效果,如图 1.

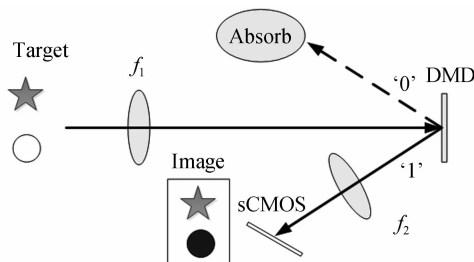


图 1 DMD 空间光调制器

Fig. 1 The diagram of the space light modulator using DMD

在高动态范围场景成像应用中,固定曝光时间  $T$  内,DMD 微镜单元处于“开”状态的时间  $t(x, y)$  与相机采集图像  $f(x, y)$  的关系如式(1)

$$f(x, y) = G(\mu E(x, y)t(x, y)) + \sigma, t(x, y) \leq T \quad (1)$$

式中  $\mu$  为光电转换效率,  $E(x, y)$  为场景在相机靶面的照度分布,  $\mu E(x, y)t(x, y)$  代表到达像素的光通量值,  $G()$  为相机响应曲线,在相机动态范围内一定区间与光通量呈正比,在光通量过大时,相机输出为饱和数据,  $\sigma$  为采集图像系统噪音分量.在曝光时间为  $T$  时,采用 DMD 能够扩展传统成像系统动态范围为<sup>[2]</sup>

$$DR_{DMD} = \frac{t_{max}}{t_{min}} \quad (2)$$

式中  $t_{max} = T$ , 而  $t_{min}$  为 DMD 所能维持最短“开”状态时间,这由导入 DMD 的控制数据速率限制,为  $43.72 \mu s$ ,增大相机曝光时间  $T$  将能提高 DMD 的调制能力,同时成像帧频降低.本文设计了在曝光时间 100 ms 的条件下,采用 12 bit 数据对微镜保持时间编码控制,控制方式如图 2,将 100 ms 做 2 048 个  $\Delta T$  等分后,控制数据 D0-D11 分别对应不同长短的时间片段,其中 D0 对应 1 个  $\Delta T$  大小,而 D1 至 D11 对应从  $\Delta T$  到  $1 024\Delta T$  的 2 倍递增时间片段,通过组合 12 bit 数据可以获得从  $\Delta T$  到  $2 048\Delta T$  的时间片段.此时  $DR_{DMD} = 2048/1$ ,理论上能够提高成像系统动态范围 66.22 dB.

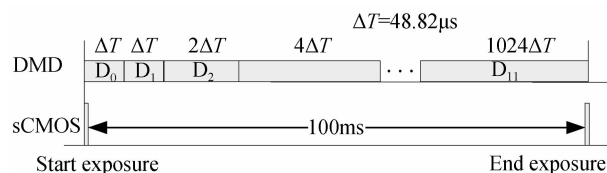


图 2 改进驱动时序

Fig. 2 Timing of the developed driver

结合具有高动态范围的科学级 CMOS 相机(CIS-2521)作为成像器件,相机动态范围约 83 dB,常温下输出图像峰值信噪比约 62 dB.验证系统总的动态范围方式为:采用 200 万倍衰减片构造动态范围相差 200 万倍的场景照度.分别用 DMD 控制微镜在“开”状态保持  $\Delta T$  和  $2 048\Delta T$  的时间采集未衰减的场景信息和经

过 200 万倍衰减的图像信息如图 3,其中(a)为实验环境,目标为高亮度的探照灯,(b)为未使用衰减片的场景在  $\Delta T$  下成像高 8 位显示,(c)为经过衰减后场景在  $2048\Delta T$  条件下采集图像,由于图像灰度集中在数据低位,(c)图做拉伸显示.由采集图像可见通过 DMD 的调制,照度相差 200 万倍的信息均能够被系统捕获,调光系统实际动态范围高于  $2 \times 10^4 : 1$ ,即大于 126 dB.

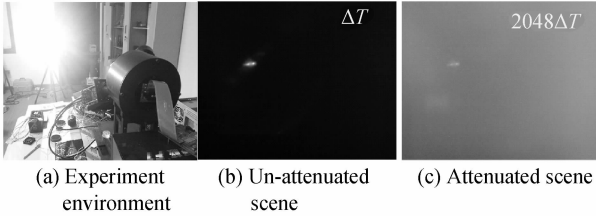


图 3 系统动态范围验证

Fig. 3 The verify of system dynamic range

## 2 像素级调光位置控制

系统中所用 DMD 分辨率  $1024 \times 768$ ,微镜尺寸为  $13.7 \mu\text{m}$ ,所选传感器 (CIS-2521) 分辨率为  $2560 \times 2160$ ,像素尺寸为  $6.5 \mu\text{m}$ .要实现 DMD 镜元对 CMOS 相机达到像素级别的调光控制,需要精确装调使 DMD 所成像与像素一一对应,通过摩尔条纹相位性质装调可以使得 DMD 所成像大小与像素尺寸大小误差在 0.04 个像素以内<sup>[2]</sup>.但是由于所设计光学系统 DMD 平面与相机靶面为一种倾斜成像关系(如图 1),并且微镜单元延其对角线方向翻转,导致采集图像出现特殊畸变,此时采用常规的仿射变换求取两个平面的映射关系将得到较大误差.

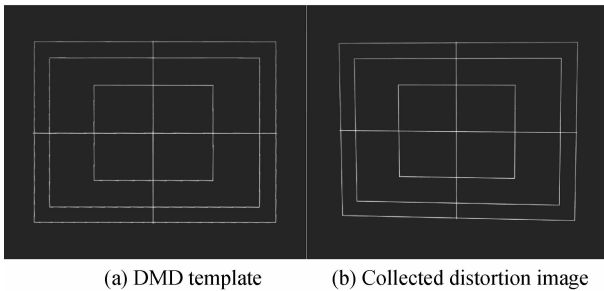


图 4 系统畸变

Fig. 4 The distortion of the system

DMD 导入理想模板数据为  $g(x',y')$ ,传感器接收到的图像为  $f(x,y)$ ,在系统不存在畸变时,  $g(x',y')$  与  $f(x,y)$  对应点坐标只有平移和缩放关系,即  $x' = ax + n, y' = ay + m$ ,而经过实际光学系统畸变后,两组坐标之间映射关系变为复杂,考虑采用高阶多项式描述两者映射关系.

$$\begin{cases} x' = \sum_{i=0}^{M_1} a_i x^i \sum_{j=0}^{N_1} b_j y^j \\ y' = \sum_{i=0}^{M_2} c_i x^i \sum_{j=0}^{N_2} d_j y^j \end{cases} \quad (3)$$

通过求取多组已知点坐标分析,发现当  $M_1 = N_2 = 2, M_2 = N_1 = 1$  时,能够拟合出较好的映射表达式,更高阶多项式虽能够更好的描述两者映射关系,但是同时计算复杂度增加.对需要调制衰减光能的点  $(x, y)$ ,计算对应 DMD 的控制点为  $(x', y')$ ,而受到系统点扩散函数影响,点  $(x', y')$  实际影响点坐标为  $(x'', y'')$  周围大概 1.5 个像素.设计调光位置控制准确度验证模板如图 5.模板为像面上均匀分布的 25 个亮点,选取 0~8 号点作为式(3)的数据,利用拟合的多项式计算 9~24 号点的控制模板,采集实际图像上亮点区域求取质心坐标计算调光位置控制偏差,如表 1.

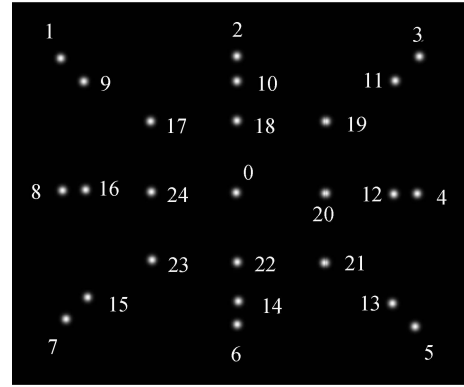


图 5 DMD 映射准确度验证模板

Fig. 5 The checked mask for DMD's precision

表 1 预调光像素位置与实际调光位置误差

Table 1 The pixel position error between expected adjustment and practical adjustment

No.	$x$	$y$	$ x-x'' $	$ y-y'' $
9	198	226	0.59	0.53
10	198	539	0.56	0.52
11	198	852	0.62	0.06
12	389	339	0.68	0.01
13	389	539	0.83	0.03
14	389	739	0.71	0.60
15	639	226	0.65	0.62
16	639	339	0.53	0.58
17	639	739	0.35	0.28
18	639	852	0.07	0.25
19	889	339	0.81	0.54
20	889	539	0.76	0.12
21	889	739	0.53	0.66
22	1080	226	0.31	0.13
23	1080	539	0.22	0.11
24	1080	852	0.07	0.17

计算 9 至 24 号的 16 个像素调光点坐标的平均误差为

$$E = \sqrt{\frac{1}{16} \sum (x-x'')^2 + \frac{1}{16} \sum (y-y'')^2} \quad (4)$$

通过计算 16 个点的坐标误差均方根值为 0.69.即采用所求多项式计算 DMD 模板对像元的实际控制误

差在 0.69 个像元准确度.

### 3 像素级调光算法研究

采用 DMD 扩展系统动态范围的一个优势在于在同一个硬件平台上可以实现不同的调光算法. 采用 DMD 的像素级调光系统如图 6. 实验中成像目标为高亮 LED 灯与其周围较暗背景.



图 6 高动态范围成像实验环境

Fig. 6 The experiment environment of high dynamic range imaging

为了数字化的描述调光模型, 令

$$I_0 = \mu E(x, y) T \quad (5)$$

$$r(x, y) = t(x, y) / T \quad (6)$$

式中  $I_0(x, y)$  为入射光强在 DMD 全“开”状态 ( $T = 100$  ms) 曝光时间产生的等效灰度值, 其与场景亮度分布成正比,  $r(x, y)$  为调光权值, 表示对场景光强的衰减强度. 假设相机在其动态范围内响应严格线性, 忽略光学系统点扩散函数影响, 则调光模型简单表示为

$$f(x, y) = I_0(x, y)r(x, y) + \delta(x, y) \quad (7)$$

采用阈值分割的基本调光算法可通过采集图像判断图像中饱和区域, 将其对应 DMD 控制模板位置权值衰减 1/2, 直到图像上所有的像素灰度值均未饱和或已经达到最小调光权值时调光停止. 具体流程为:

1) 初始 DMD 调光权值为 1, 采集图像  $f_0(x, y)$ , 设计一个接近饱和的阈值  $S_{Th}$  分析图中高亮区域, 当  $f_0(x, y) > S_{Th}$ , 将饱和区域  $(x, y) \in Z_1$  对应权值衰减为原权值 1/2, 即  $r_{z_1}(x, y) = r_z(x, y) / 2$ , 采集一次调光后图像  $f_1(x, y)$ .

2) 重复步骤 1), 多次调光后直至采集图像像素灰度值均在阈值以下, 即  $f_n(x, y) \leq S_{Th}$ , 或者  $r_z(x, y) = 1/2048$ , 调光停止.

从调光停止的条件可知若已经采用最小权值调光后图像仍然饱和, 则说明场景的亮度过高, 超出系统所能采集光强动态范围. 若所有像素均未饱和, 则认为高动态范围场景数据已经被记录下来. 这种基于阈值的调光算法调光速度较快, 可实时观察到渐进的调光结果, 但是由于其采用固定阈值, 并且调光权值仅由 1/2 递减的几个离散数值组成, 调光后的图像会出现严重

阶梯状分布.

图 7 为采用阈值分割法快速调光的过程, 通过逐帧计算逐步调整调光权值衰减, 右下角为最后生成的调光模板. 图像高亮区域周围的邻域逐渐被调节至相机线性区域, 最终的调光结果虽然高亮部分的灯珠可见, 但是整体图像可视性较差, 权值跳变边缘的剧烈影响, 处于阈值周围的像素, 由于受到不同权值的调制, 调制后的灰度值相差较大, 由此恢复的图像数据也不准确.

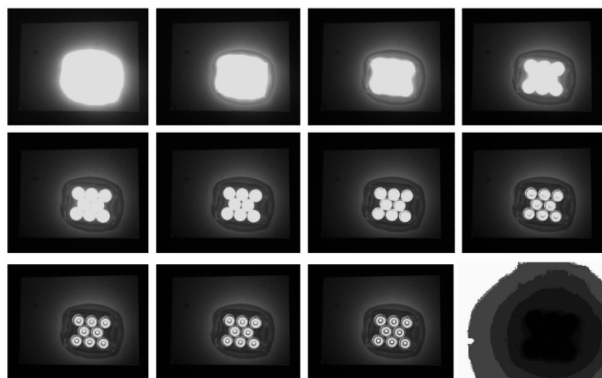


图 7 基于阈值分割快速调光过程

Fig. 7 The fast light adjusting process based on segment

为了使得调光后的图像符合人眼视觉特性, HDR 场景信息通过调光压缩到低动态范围相机采集图像, 采用高动态范围图像压缩显示领域常用的色阶映射算子 (Tone Mapping Operator, TMO) [11], 令

$$f(x, y) = T(I_0(x, y)) \quad (8)$$

式中  $T()$  为某种符合人眼视觉特性的色阶映射算子, 常用作将高动态范围图像压缩到低动态范围显示器以作显示. 在 HDR 图像压缩显示领域, HDR 图像往往是已知值, 而在本系统中,  $I_0(x, y)$  采用 DMD 产生一系列常量调光权值做测量模板, 对  $I_0(x, y)$  的值进行多次测量得出, 采集图像与场景信息关系为

$$I_0(x, y) = \frac{f(x, y) - \delta(x, y)}{r(x, y)} \quad (9)$$

实际上相机噪音量  $\delta(x, y)$  并不能准确去除, 计算时以  $f(x, y)$  代替  $f(x, y) - \delta(x, y)$  进行场景数据恢复, 恢复场景数据为  $I_r(x, y)$ , 此时  $I_r(x, y) = f(x, y) / r(x, y)$ , 恢复数据绝对误差为

$$\Delta I(x, y) = I_r(x, y) - I_0(x, y) = \frac{\delta(x, y)}{r(x, y)} \quad (10)$$

恢复场景的相对误差为

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \frac{\delta(x, y)}{f(x, y) - \delta(x, y)} \quad (11)$$

当相机噪音  $\delta(x, y)$  不可忽略时, 恢复场景的绝对误差由调光权值决定, 调光权值越大, 事后恢复的场景图像误差越小. 而相对误差由相机采集灰度值决定, 即采集灰度值越大, 恢复场景的相对误差越小. 在测量  $I_0(x, y)$  时, 一方面应该尽量选用调光权值大的数据,

另一方面应该尽量选择相机采集图像灰度值较大的数据进行场景恢复数据. 在不同的调光权值下相机能够采集到  $I_0(x, y)$  不同亮度范围信息, 采用多次测量能够恢复出更精确的场景数据, 但是时间复杂度增加.

本文设计一种采用 4 帧固定调光权值的测量方法: 采用 DMD 输出调光权值为  $1/2048, 16/2048, 256/2048, 2048/2048$  调光模板, 在模板下采集图像分别为  $f_0, f_1, f_2, f_3$ , 设计一个阈值区间  $U$ , 其中  $U_{\max}/U_{\min} = 16$ , 且  $U_{\max}$  接近相机饱和灰度值. 从四副图像中依次选取  $f_i \in U$  的像素计算恢复场景数据, 当多幅图像中同一位置像素灰度均在阈值区间时, 选取权值模板较大情况下采集数据作为恢复依据. 不同调光权值下采集图像如图 8, 随着调光权值增大, 图像整体灰度增大, LED 灯逐渐饱和并且导致背景书籍上部分文字区域饱和而不能辨识. 采用 4 幅图像恢复的高动态范围场景数据如图 8 所示(已做高动态压缩显示), 其中灯珠中心区域恢复并不准确, 这是由于目标过亮即使采用权值  $1/2048$  也不能够将其衰减到相机未饱和灰度区间.



图 8 不同权值下采集图像  
Fig. 8 Collected images under different weights



图 9 恢复高动态场景图像  
Fig. 9 High dynamic scene image after recovering

经过恢复的高动态范围图像为  $I_r(x, y)$ , 设预期调光后图像为  $g(x, y)$ , 利用某种色阶映射算子可以从  $I_r(x, y)$  中计算出  $g(x, y)$  的确定值, 那么最终调光模板为

$$r(x, y) = \frac{g(x, y)}{I_r(x, y)} \quad (12)$$

本文选用自适应对数算子<sup>[11]</sup>对恢复场景进行压缩, 这种映射算子因为计算量少, 压缩效果好而被广泛应用, 但这种映射算子为了获得最佳的压缩显示效果, 需要人工进行多个参量调整. 获得预期调光图像如式(13), 调光权值计算为式(14).

$$g(x, y) = \frac{S_{\max}}{\lg(1 + I_{u\max})} \frac{\ln(1 + I_r)}{\ln\left(2 + 8\left(\frac{I_r}{I_{u\max}}\right)^{\ln(b)/\ln(0.5)}\right)},$$

$$I_{u\max} = e \frac{I_{\max}}{I_{\text{blur}}} \quad (13)$$

$$r(x, y) = \frac{S_{\max}}{\lg(1 + I_{u\max})} \times \frac{\ln(1 + I_r)}{\ln\left(2 + 8\left(\frac{I_r}{I_{u\max}}\right)^{\ln(b)/\ln(0.5)}\right)} I_r \quad (14)$$

式中  $e$  代表曝光参量, 用来调节图像整体亮度,  $I_{\text{blur}}$  为图像经过高斯低通滤波后的图像, 表示区域平均亮度水平,  $b$  决定了高亮度像素被压缩的程度, 一般取值为 0.7 到 0.9 之间.  $S_{\max}$  为相机输出最大灰度值,  $I_{\max}$  为恢复场景最大灰度值. 计算出的权值为连续的小数值  $r(x, y)$ , 而系统实际可用的调光权值  $r(x, y)$  为  $n/2048$ , 记做  $r_n(x, y)$ , 为离散的 2048 个取值, 实际计算时连续取值的  $r(x, y)$  可由最逼近其值  $r_n(x, y)$  代替. 但是由于权值的离散, 导致连续的场景灰度在调制后为离散值, 图像会出现阶梯状, 在高亮度区域将较为明显.

## 4 像素级调光结果

高动态范围场景像素级调光实验如图 10, 从左到右依次是调光前图像, 根据色阶映射算子计算出的调光权值模板和对应调光后图像. 高动态范围场景通过 DMD 进行像素级别的光能衰减后, 两组实验场景中灯珠图像与背景能够同时被采集到, 图像整体变化自然. 两组实验均存在灯珠中心处亮度过高, 即使 DMD 调光权值为  $1/2048$  此处图像仍然饱和的情况, 这是由于场景亮度过大, 超出系统动态范围, 在计算恢复场景时已有较大误差, 由于调光权值的离散, 在图像周围依然存在一些人眼可见的阶梯状灰度分布. 但是调光后图像中所包含的场景信息量已经得到很大提高, 图像质量较阈值分割法有明显提高.

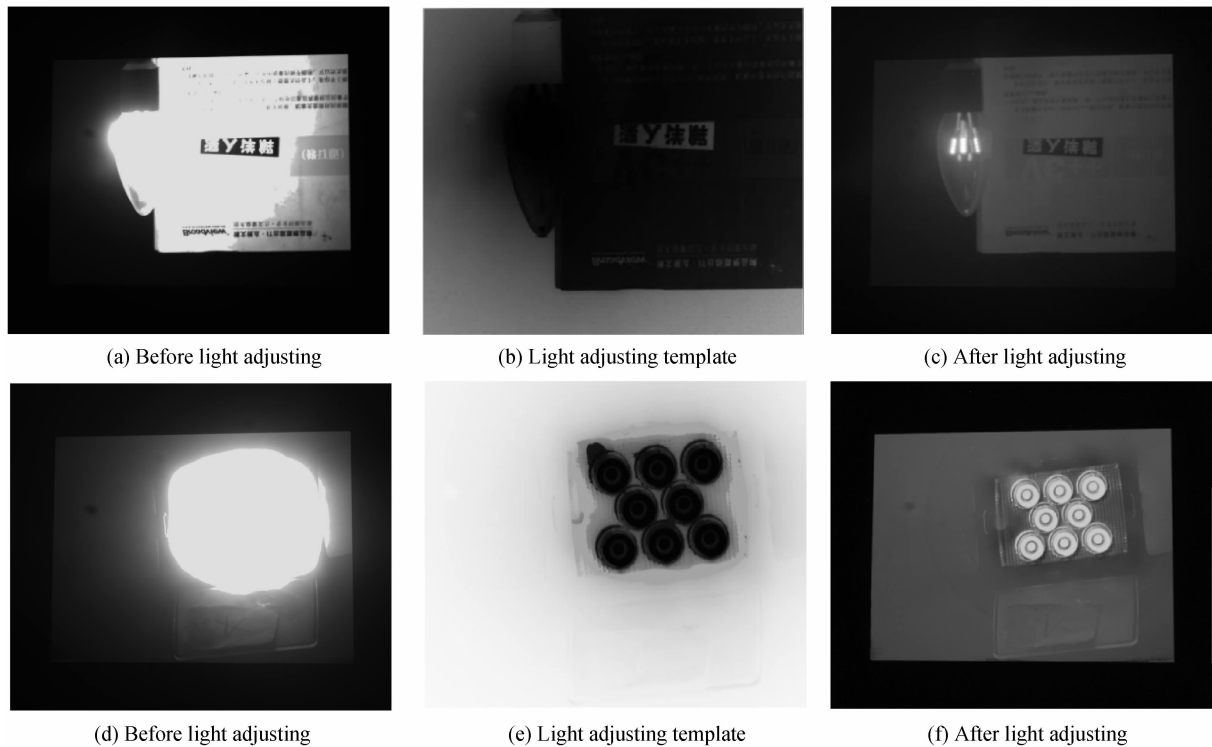


图 10 高动态范围场景调光实验

Fig. 10 The high dynamic range scene light adjusting experiment

客观上对像素级调光前后图像的评价采用图像熵进行描述<sup>[6-12]</sup>. 图像熵表示为图像灰度级集合的比特平均数,单位为比特/像素,也描述了图像信源的平均信息量,图像熵值越大代表图像中包含的信息量越丰富. 对于离散形式的二维图像,其图像熵的计算公式为

$$h = -\sum_{i=1}^n p(i) \log_2 [p(i)] \quad (15)$$

式中  $p(i)$  为灰度值为  $i$  的像素出现的概率. 调光前后图像的信息含量如表 2,可见调光后图像熵明显高于调光前,调光后图像包含更多的信息量.

表 2 调光前后图像熵对比

Table 2 The image entropy before and after light adjusting

	Before adjusting	After adjusting
Scene 1	8.25	10.71
Scene 2	7.49	8.21

## 5 结论

采用 DMD 作为像素级空间光调制器件扩展传统成像设备动态范围,对高动态范围场景进行成像. 分析了 DMD 扩展成像设备动态范围的原理,通过设计 DMD 高位宽驱动时序,提高成像系统动态范围 66 dB,结合高动态范围科学级 CMOS 相机作为成像器件,系统总的动态范围达到 126 dB. 采用多项式拟合法求取 DMD 到畸变图像的映射关系,调光位置控制准确度达到 0.69 像元级别. 针对一般调光算法导致调光后图像可视性差的问题,引入色阶映射算子求解调光模板,最终调光后的图像中高亮目标与暗背景能同时被观察

到,图像整体变化自然,符合人眼视觉特性,调光后图像熵显著高于调光前图像.

### 参考文献

- [1] XU Zheng-ping. Application of digital micromirror device in photoelectric equipment [J]. *Laser & Opto Electronics Progress*, 2014, **51**(5): 91-100.  
徐正平. 数字微镜器件在光电设备中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, **51**(5): 91-100.
- [2] HE Shu-wen, LIU Yan-yin, SUN Hong-hai, *et al.* Studying of the pixel level light adjustment technology under high dynamic scene based on DMD[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(6): 1063-1070.  
何舒文,刘艳滢,孙宏海,等. 基于数字微镜器件的高动态范围场景像素级调光技术研究[J]. *光电子·激光*, 2014, **25**(6): 1063-1070.
- [3] WANG Yan-jie, CHEN Huai-zhang, LIU Yan-yin, *et al.* Application of DMD to high dynamic scene image detection system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(9): 2508-2517.  
王延杰,陈怀章,刘艳滢,等. 数字微镜器件在高动态辐射场景成像探测系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(9): 2508-2517.
- [4] CHEN Huai-zhang, WANG Yan-jie, SUN Hong-hai, *et al.* High dynamic range imaging detection based on DMD and image sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(12): 3402-3409.  
陈怀章,王延杰,孙宏海,等. DMD 结合图像传感器的高动态场景成像探测[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(12): 3402-3409.
- [5] ZHOU Wang. Study on enhancing dynamic range of CCD image based on digital micro-mirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 638-642.  
周望. 基于数字微镜器件技术提高面阵 CCD 相机动态范围的

- 研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 638-642.
- [6] YANG Z D, WANG P, LI X H, *et al.* Study on pixel-level image brightness adjustment method based on LCoS [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, **34**(1): 147-152.
- 杨中东, 王鹏, 李晓慧, 等. 基于 LCoS 像素级图像亮度调整方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, **34**(1): 147-152.
- [7] SHREE K, NAYAR V B. Programmable imaging: towards a flexible camera [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2006, **70**(1): 7-22.
- [8] MANNAMI H, SAGAWA R, MUKAIGAWA Y, *et al.* Adaptive dynamic range camera with reflective liquid crystal [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2007, **18**(5): 359-365.
- [9] CHEN Fang-han, ZHAO Guang-yu, JIANG Shi-long, *et al.* Optical system design of dmd digital fringe projection based on the application of 3-D defect inspections[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 0222002.
- 陈方涵, 赵光宇, 蒋仕龙, 等. 基于三维缺陷检测的 DMD 数字条纹投影光学系统设计[J]. 光子学报, 2015, **44**(2): 0222002.
- [10] LIU Hai-ying, LI Yun-song, WU Cheng-ke. A method for compressive sensing of images based on zone control of digital micromirror device and super-resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0510002.
- 刘海英, 李云松, 吴成柯. 一种数字微镜阵列分区控制和超分辨重建的压缩感知成像法[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0510002.
- [11] YANG Ke-hu, JI Jing, GUO Jian-jun, *et al.* High dynamic range images and tone mapping operator [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(2): 113-122.
- 杨克虎, 姬靖, 郭建军, 等. 高动态范围图像和色阶映射算子[J]. 自动化学报, 2009, **35**(2): 113-122.
- [12] YANG Zuo-ting, RUAN Ping, ZHAI Bo. Auto-exposure algorithm for scenes with high dynamic range based on image entropy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6): 742-746.
- 杨作廷, 阮萍, 翟波. 基于图像熵的高动态范围场景的自动曝光算法[J]. 光子学报, 2013, **42**(6): 742-746.