

基于数字微镜成像系统的响应曲线标定方法研究

冯维^{1,2}, 曲兴华¹, 王惟婧¹, 张福民^{1,*}

¹天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

²湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068

摘要 高动态范围成像技术是当前光学成像领域的研究热点。基于数字微镜器件(DMD)具有调制入射光线空间信息的特性,设计了一种 DMD 相机,可提高成像系统的动态范围。同时,为了合理有效地编码控制 DMD,根据该成像系统的结构及成像特征,利用数学分析方法先后标定了 DMD 调光响应曲线和 CMOS 图像探测器的响应曲线,并在此基础上提出基于 DMD 相机的响应曲线标定方法。实验表明,该成像系统突破了普通数字相机动态范围的限制,动态范围可提高至 96 dB 以上。同时,还完成了 DMD 相机响应函数的快速标定,为实现 DMD 掩模的自适应调整提供了重要依据。

关键词 成像系统; 响应曲线; 标定; 高动态范围; 数字微镜器件

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0411006

Research on Response Curve Calibration Method of Imaging System Based on Digital Micromirror Device

Feng Wei^{1,2}, Qu Xinghua¹, Wang Weijing¹, Zhang Fumin¹

¹State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,

Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

Abstract High dynamic range imaging technology is a research hotspot in the field of optical imaging. Digital microscopy device (DMD) has the characteristics of modulation incident ray spatial information. A high dynamic range imaging system with high-resolution is developed based on DMD, which could improve the dynamic range of the imaging system. At the same time, in order to reasonably and effectively control the DMD, the response curve of DMD modulation and CMOS image detector are calibrated by using mathematical analysis method, and the response curve calibration method of DMD camera is proposed according to the structure and imaging characteristics of the imaging system. The experimental results show that the imaging system has a dynamic range larger than the ordinary ones, which can reach more than 96 dB. The fast response function calibration of the DMD camera is also completed, which provides the powerful foundation for the adaptive adjustment of the DMD mask.

Key words imaging systems; response curve; calibration; high dynamic range; digital micromirror device

OCIS codes 110.1758; 150.1488; 230.6120

1 引 言

动态范围是评价成像设备图像质量的一项重要指标,动态范围越大表示该成像设备能探测到更宽广范围内的场景信息,所记录图像的明暗部细节越丰富。CCD 和 CMOS 固态图像传感器具有低功

耗、低成本和易集成等优势,已经被广泛应用于各类图像成像设备中。然而,普通的 CCD 或者 CMOS 数字相机的动态范围往往低于 60 dB,仅能满足一般的成像需求。当所探测场景中含有强光反射时,传统的数字相机往往难以有效地获取该高动态范围场景的信息。因此,如何提高成像系统的动态范围

收稿日期: 2017-08-31; 收到修改稿日期: 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(51775379,51675380)

作者简介: 冯维(1988—),男,博士研究生,主要从事计算成像与精密测量方面的研究。E-mail: david0806@tju.edu.cn

导师简介: 曲兴华(1956—),男,博士,教授,主要从事激光及光电测量方面的研究。E-mail: quxinghua@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

是当前光学成像领域迫切需要解决的难题之一。

针对这一问题,国内外学者先后提出了多种高动态范围成像方法,如多次曝光法^[1-2]、多相机组合曝光法^[3]及硬件拓展法^[4-7]等,以满足高动态范围场景下的成像与测量需求。与上述方法不同,利用数字微镜器件(DMD)能在每秒内完成超过上万次的高速状态转换的优势^[8],以及具有调制入射光线空间信息的特性,本文设计了一种新型的基于DMD的高动态范围成像系统,并提出自适应高动态范围成像方法,可将该成像系统的动态范围扩大至96 dB以上^[9-10]。在该成像系统中,DMD通过二进制脉冲宽度调制技术实现全数字方式的入射光线强度调制,从而有效控制成像系统的曝光量,因此精确地编码控制DMD直接决定着该成像系统的成像质量。通常,采用8 bit的二进制图像作为DMD掩模,并对DMD进行编码控制。为了合理有效地设计DMD掩模,就必须定量地分析DMD掩模的灰度对该成像系统所采集图像灰度的实际调制效果。本文将DMD掩模的灰度对成像系统采集图像灰度的调制程度,称为成像系统的响应函数,只有标定出该成像系统的响应曲线及函数,才能为实现DMD掩模的自适应调整提供有力保障。

目前,相机响应曲线的标定方法主要分为两类。一类是把相机响应函数看作离散函数,通过设置不同的相机曝光时间,依次采集图像序列,将256个离散数值与实际的平均辐照度作为未知数,利用权重系数和最小二乘法等数学分析方法求解出相机响应曲线函数^[11-13];另一类是将相机响应函数看作一个多项式,要求用等倍率的曝光时间作为采样时间,根据比例关系并利用多项式逼近和递归求解的方式解算相机响应曲线函数^[14-15]。然而,上述两类标定方法均只适用于遵循“小孔成像”原理的传统数字相机,对于在成像光路中加入了DMD的新型计算成像系统,由于DMD光学器件的反射及衍射光学特性的影响,上述方法并不能完全适用。

为提高成像系统的动态范围,本文首先介绍了一种高分辨率的计算成像系统——DMD相机,突破了普通数字相机动态范围的限制。同时根据该成像系统的结构及成像特征,先后标定了DMD调光响应曲线以及CMOS图像探测器的响应曲线,并在此基础上提出基于DMD相机的响应曲线标定方法。最后通过实验完成了DMD相机响应函数的快速标定,为实现DMD掩模的自适应调整提供了重要依据。

2 成像系统的设计与原理

2.1 成像系统的设计

DMD是一种精密的数字光学开关,它是由数百万个可独立控制位置状态的高速数字式微小平面镜阵列组成,通过二进制脉宽调制技术能精确地实现微镜状态(“开”态、“平”态和“关”态)的快速转换,从而以全数字方式实现入射光线的强度调制。近年来,DMD作为科学研究的有效工具已经在压缩感知、数字全息、光学测量及高分辨率成像等不同领域得到了广泛的应用^[16-20]。

在前期研究中,已经设计出一款新型高分辨率的高动态范围成像系统——DMD相机,光学原理图如图1(a)所示。该成像系统主要由DMD、全内反射(TIR)棱镜、CMOS图像探测器、透镜组1、透镜组2和处理器共6个部分组成。DMD被放置于CMOS图像探测器的成像光路上,并与CMOS像平面垂直。当DMD微镜处于“开”状态时,从被测物表面反射的光线经透镜组1和TIR棱镜将高动态场景成像在DMD像平面;经过DMD对入射光线编码调制后,其反射光线以 24° 偏角再次进入TIR棱镜内,反射光线在TIR棱镜中发生内全反射,改变传播方向并进入到透镜组2,经该成像物镜会聚后在CMOS图像探测器上成像。反之,当DMD微镜

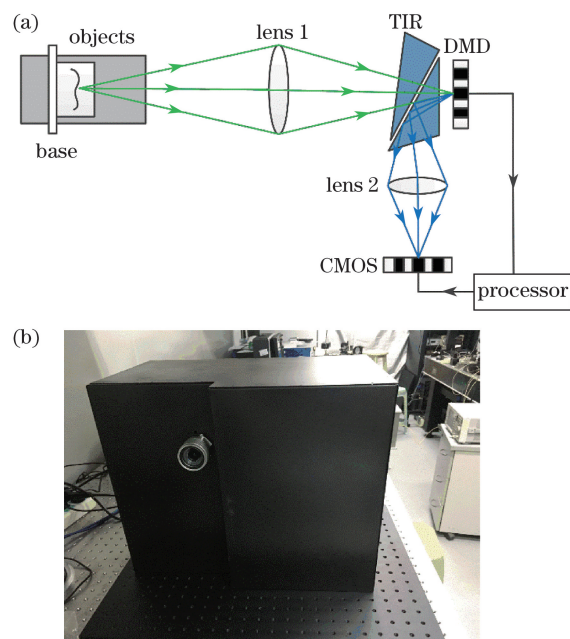


图1 基于DMD的高动态范围成像系统。

(a)光学原理图;(b)原理样机

Fig. 1 High dynamic range imaging system based on DMD.

(a) Optical schematic diagram; (b) hardware prototype

处于“关”状态时,被测物反射的光线不能进入 CMOS 图像探测器成像。因此,入射光线进入 DMD 相机内能否成像是由 DMD 微镜状态决定的,该成像系统实现了在二维空间内的选择性成像。

图 1(b)是 DMD 相机的原理样机。空间光调制器选用 Texas Instruments 0.65 inch DMD,有效分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,各微镜尺寸为 $7.56 \mu\text{m} \times 7.56 \mu\text{m}$,最高可达 247 帧 8 位灰度图像显示。CMOS 图像探测器的有效分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,最高帧率可达 $121 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过计算机可控制 DMD 的刷新频率与 CMOS 图像探测器的采样速率保持一致,所采用的双远心光学镜头透镜组 2 可实现 DMD 微镜与 CMOS 图像探测器像素的一一对应。为使成像系统结构更加紧凑,将 TIR 棱镜置于 DMD 前用以折叠光路。该成像系统的有效分辨率可达到 200 万像素,完全满足高速高分辨率的成像需求。

2.2 基于 DMD 的自适应高动态成像原理

基于 DMD 的自适应高动态范围成像过程如图 2 所示。首先,所有的 DMD 微镜被设置为“开”状态,因而被测物的反射光线经 DMD 编码调制后可在图像探测器中成像;其次,该原始图像被传输至计算机,计算原图像中的亮度分布,利用最大类间方差法判别编码图像中是否存在过饱和区域并提取原图像中的过饱和区域^[21];然后,根据 DMD 微镜与 CMOS 像素的匹配与映射关系,结合成像系统的响应曲线特征,设计自适应光强编码控制算法,生成合适的 DMD 掩模来精确控制 DMD 各微镜的状态,实现对相应区域入射光线的有效衰减。依次迭代,直至最终获得的编码图像完整清晰,从而达到了自适应高动态范围成像的目的。由此可知,成像系统的标定是实现自适应高动态范围成像的关键环节之一,它直接影响着所生成掩模的质量,进而影响成像的准确度。

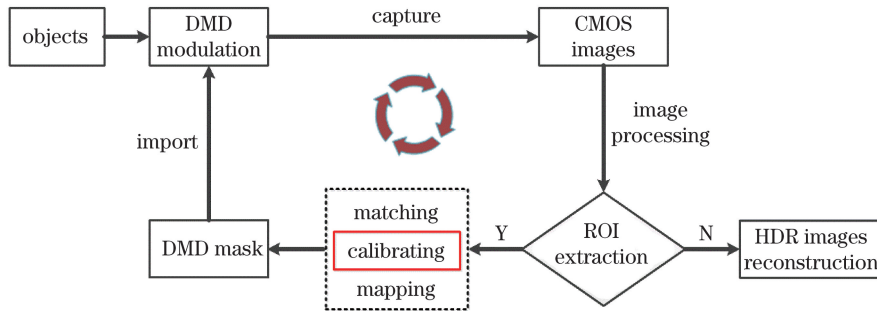


图 2 基于 DMD 的自适应高动态范围成像过程

Fig. 2 Process of adaptive high dynamic range imaging based on DMD

在 DMD 相机中,核心成像器件是 CMOS 固态图像传感器,其动态范围通常被定义为

$$D = 20 \cdot \lg\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right), \quad (1)$$

式中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别表示图像传感器能探测到的最大亮度值和最小亮度值。故对于普通 8 bit 的数字相机, $D = 20 \lg 255 = 48.13 \text{ dB}$ 。

DMD 作为空间光调制器,主要用于记录入射光的衰减值。设 T_{\max} 和 T_{\min} 分别表示 DMD 微镜保持“开”状态的最长时间和最短时间,则 DMD 相机的动态范围可以表示为

$$D_{\text{sys}} = 20 \cdot \lg\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \cdot \frac{T_{\max}}{T_{\min}}\right). \quad (2)$$

当用 8 bit 的二进制图像作为掩模对 DMD 进行编码控制时,DMD 相机的动态范围是 $20 \cdot \lg(255 \times 255) = 96.26 \text{ dB}$ 。因此,DMD 相机的动态范围远大于 8 bit 的普通数字相机,其性能相当于一个非常昂贵的

16 bit 的图像传感器的动态范围。因此,该成像系统突破了普通数字相机动态范围的限制,在不改变原图像探测器结构的情况下,利用 DMD 的高速状态转换特性,可灵活地调制入射光线的空间信息,使进入成像系统的光线强度始终处于图像探测器的合理曝光强度内,实现了自适应高动态范围成像的目标。

3 成像系统的响应曲线标定方法

根据 DMD 相机结构及光路特征,物体表面反射的光线经透镜组 1 会聚后在 DMD 表面完成一次成像;接着反射光线进入 TIR 棱镜内发生内全反射后经透镜组 2 会聚后在 CMOS 图像探测器上实现二次成像。因此,DMD 掩模的灰度对成像系统采集图像灰度的调制程度主要受 DMD 的调光响应能力以及 CMOS 图像探测器响应性能的影响。

3.1 DMD 的调光响应曲线标定方法

DMD 作为成像系统的核心器件,主要用于调

制入射光线的强度,因此需要分析 DMD 的调光能力,即需要对不同的 DMD 掩模输入与实际光能衰减效果输出进行验证。

DMD 掩模为 8 bit 的编码图像,可以将 DMD 的调光响应函数视为一个由 256 个数值组成的离散函数。在外界均匀稳定的光源照射下,通过输入不同的 DMD 掩模 $M_i(x, y)$ 与采集到图像的灰度值 $V_i(x, y)$ 关系,可拟合出 DMD 的调光响应曲线。

3.2 CMOS 图像探测器的响应曲线标定方法

为了标定 DMD 相机的响应曲线,达到图像自适应调整的目的,需要先对 CMOS 图像探测器的固有曲线进行标定。假设场景是静态的且忽略光照变化,当外界光照条件在 CMOS 图像探测器的有效成像范围内,数字相机的固有曲线表达式可表示为

$$C_{i,j} = f(E_{i,j} \cdot \Delta t_j), \quad (3)$$

式中 $C_{i,j}$ 表示第 j 幅图像中第 i 位置的图像灰度值; f 是非线性函数,表示该数字相机的响应曲线; i 表示像素位置的索引,且 $i = 1 \sim N$; j 表示不同图像的索引,且 $j = 1 \sim M$; $E_{i,j}$ 表示第 j 幅图像中第 i 位置处的平均照度值; Δt_j 是采集第 j 幅图像的曝光时间。

通常情况下,像素的曝光时间越长,像素灰度值越大,因此图像探测器的固有曲线函数 f 是单调函数,且存在逆函数。其逆函数可表示为

$$f^{-1}(C_{i,j}) = E_{i,j} \cdot \Delta t_j. \quad (4)$$

对(4)式两边同时取自然对数,可得

$$\ln f^{-1}(C_{i,j}) = \ln E_{i,j} + \ln \Delta t_j. \quad (5)$$

令 $g(C_{i,j}) = \ln f^{-1}(C_{i,j})$, 则(5)式可简化为

$$g(C_{i,j}) = \ln E_{i,j} + \ln \Delta t_j, \quad (6)$$

式中 $C_{i,j}$ 和 Δt_j 已知, $g(C_{i,j})$ 和 $\ln E_{i,j}$ 未知。由于 CMOS 图像探测器所采集的图像为数字图像,故 $C_{i,j}$ 是 $0 \sim 255$ 的整数。在该图像探测器的曝光范围内, $g(C_{i,j})$ 可视为由 256 个数值构成的函数。当 $C_{i,j}$ 和 $\ln \Delta t_j$ 已知时,对(6)式的求解可转换为最小二乘目标函数的求解:

$$o = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [g(C_{i,j}) - \ln E_{i,j} - \ln \Delta t_j]^2, \quad (7)$$

式中 M 是原图像数, N 为采样点的个数。

通常像素灰度值靠近 0 与 255 的像素点的曝光量不稳定,且数据采样点有限,易造成曲线的两端斜率变化很大,导致曲线的非线性特征比较突出。为了减少这种非线性的影响,使拟合的曲线更加平滑,在(7)式中引入加权函数 $\omega(c)$, 以加强中间线性区域的权重。考虑到图像的噪声通常呈高斯分布,本

文采用改进的高斯加权函数以有效地减少噪声的干扰,加权函数 $\omega(c)$ 表示为

$$\omega(c) = \exp[-k \cdot (c - c_{\text{mid}})^2 / 2 \cdot c_{\text{mid}}^2], \quad (8)$$

式中 c_{mid} 取图像灰度均值的中间值(一般默认取 128), k 依据图像的个数取值。则目标函数(7)式可改写成:

$$o = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \{\omega(C_{i,j}) \cdot [g(C_{i,j}) - \ln E_{i,j} - \ln \Delta t_j]\}^2. \quad (9)$$

为了使拟合曲线更加平滑,可引入平滑项

$$g''(c) = g(c-1) + g(c+1) - 2g(c), \quad (10)$$

则(9)式可表示为

$$o = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \{\omega(C_{i,j}) \cdot [g(C_{i,j}) - \ln E_{i,j} - \ln \Delta t_j]\}^2 + \lambda \cdot \sum_{c=1}^{254} [\omega(c) \cdot g''(c)]^2, \quad (11)$$

式中 λ 是限制系数,可根据实验需求设定。对(11)式采用奇异值分解可求得最小二乘解。

3.3 DMD 相机的响应曲线标定方法

如前所述,根据该成像系统的特征,设 $D_{i,j}$ 表示 DMD 相机的响应曲线函数,可表示为

$$C_{i,j} = C_{i,j}^{255} \cdot D_{i,j}, \quad (12)$$

式中 $C_{i,j}^{255}$ 代表在 DMD 未参与调制时, DMD 相机采集的第 j 幅图像中第 i 位置的图像灰度值。因此,成像系统近似的响应曲线可以表示为

$$D_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{C_{i,j}^{255}}. \quad (13)$$

(13)式表明,成像系统的响应曲线可由当前 DMD 相机中所获取的图像实际灰度值与其在原 CMOS 图像探测器中的灰度值之比获得。具体方法步骤如下:1)选用表面反射率均匀的平板为测量对象,生成的 256 幅 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 单色灰度图像作为 DMD 的掩模,掩模的灰度在 $0 \sim 255$ 之间;2)在同一稳定光源环境下照射被测对象,将 256 幅不同灰度的图像掩模导入 DMD 中,并分别记录在不同掩模下 DMD 相机所采集到的图像 $C_{i,j}$;3)改变光源亮度,重复步骤 2)两次;4)根据(13)式分别计算上述三组数据的近似响应曲线;5)对上述三组近似响应曲线进行多项式拟合,得到成像系统的响应曲线函数 $D_{i,j}$ 。

4 实验结果及分析

4.1 DMD 的调光响应曲线标定结果

为较为准确地分析 DMD 的调光能力,实验中

先后采集经不同灰度的 DMD 掩模调制后的图像进行光能衰减效果的验证。其具体实验步骤如下。

1) 分别制作 27 幅灰度值分别为 $\{0, 10, 20, \dots, 250, 255\}$ 的单色灰度图像作为 DMD 的图像掩模。

2) 在同一稳定光源环境下, 选用表面反射率较为均匀的平板作为被测对象。先后将 27 幅不同灰度的 DMD 掩模导入至 DMD 中, 并分别记录在不同掩模下 CMOS 图像探测器所采集到的图像 I_i 。为了减少噪声的影响, 提取每幅图像中固定区域为 $200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ 的所有像素并进行等间隔采样, 取其中 400 个像素点的平均灰度值作为该图像 I_i 的等效灰度值 $V_i(x, y)$, 其与该 DMD 掩模调制下 CMOS 图像探测器采集的图像等效。

3) 根据图像等效灰度值 $V_i(x, y)$ 与 DMD 掩模 $M_i(x, y)$ 的对应关系, 经拟合后可获得 DMD 的调光响应曲线。其实验结果如图 3 所示。

经归一化后, DMD 调光响应曲线方程可表示为

$$y = 0.0038x + 0.0089. \quad (14)$$

由此可知, 图像等效灰度值与 DMD 掩模线性正相关, 这表明作为空间光调制器的 DMD 具有良好的线性度。

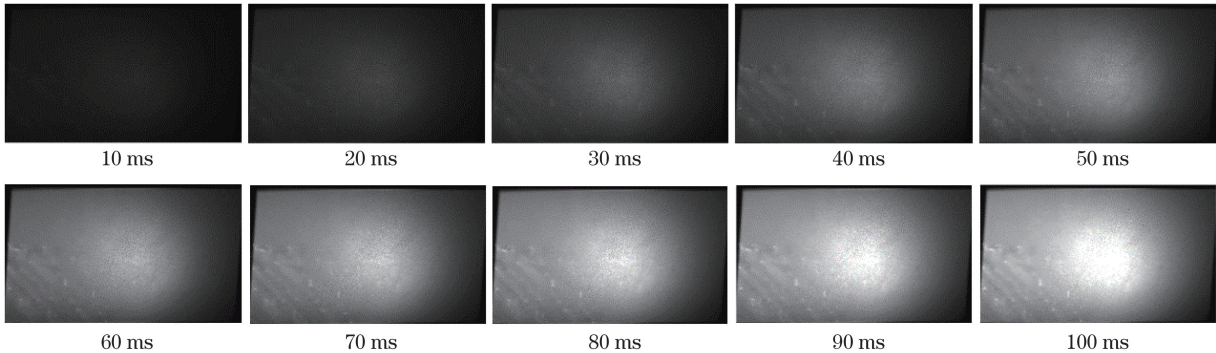


图 4 相同外界环境下不同曝光时间的图像序列

Fig. 4 Image sequence with different exposure time under the same condition

2) 在每幅图像上选定相同位置和大小区域, 等间隔均匀采样 100 个像素点, 记录其图像灰度值 $C_{i,j}$ 。将原图像数 $M=10$ 和采样点数 $N=100$ 代入 (11) 式, 可得:

$$o = \sum_{i=1}^{100} \sum_{j=1}^{10} \{ \omega(C_{i,j}) \cdot [g(C_{i,j}) - \ln E_{i,j} - \ln \Delta t_j] \}^2 + \lambda \cdot \sum_{c=1}^{254} [\omega(c) \cdot g''(c)]^2. \quad (15)$$

3) 对 (15) 式中的 $g(C_{i,j})$ 和 $\ln E_{i,j}$ 分别求导, 并利用最小二乘法即可求解出该 CMOS 图像探测器的固有曲线。结果如图 5 所示。

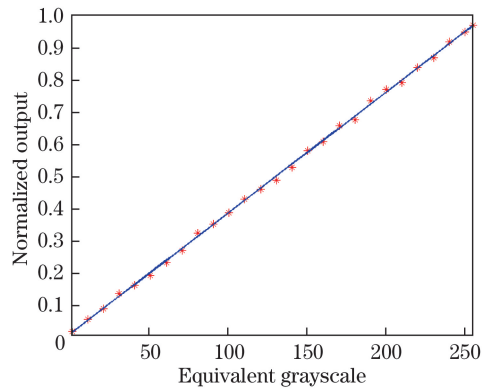


图 3 DMD 调光响应曲线

Fig. 3 Response curve of DMD modulation

4.2 CMOS 图像探测器的响应曲线标定结果

由 3.2 节所述方法可知, CMOS 图像探测器响应曲线标定算法中所需图像是在相同外界环境下对同一静态场景依次采集不同曝光时间的图像序列。具体实验过程如下。

1) 在同一稳定光源环境下, 被测物静止不动, 设置不同的曝光时间并进行图像采集。曝光时间分别为: $10, 20, \dots, 100 \text{ ms}$, 共采集 10 幅图像, 如图 4 所示。

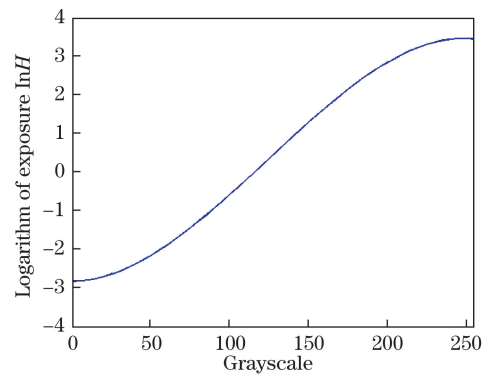


图 5 CMOS 图像探测器的响应曲线

Fig. 5 Response curve of CMOS detector

根据 CMOS 图像探测器的响应曲线,采用最小二乘三次拟合,可得图像灰度与输入辐照度的关系为

$$C_{i,j} = -8.1399 \times 10^{-7} (\ln E_{i,j})^3 + 3.0229 \times 10^{-4} (\ln E_{i,j})^2 + 4.1322 \times 10^{-4} (\ln E_{i,j}) - 2.8074. \quad (16)$$

4.3 DMD 相机的响应曲线标定结果

为实现 DMD 掩模的自适应调整,需要标定出 DMD 相机的响应曲线,即解算出 DMD 掩模的灰度与采集图像亮度之间关系。为减少外界环境杂散光的影响,实验在暗室中进行。根据 3.3 节所述方法,分别在三种不同强度的稳定光源照射下,先后将 256 幅不同灰度的图像掩模导入 DMD 中,DMD 相机所获得的三组图像的灰度离散数据经归一化拟合处理后,得到如图 6 所示的三条不同的曲线标定结果,分别用青色、绿色和蓝色曲线以示区分。由于图像采集过程中环境因素带来的噪声不可避免,以及 CMOS 图像探测器对入射光的非线性响应的影响,三组数据各自拟合的曲线会略有波动,但是从整体上看,三组数据具有一致性。

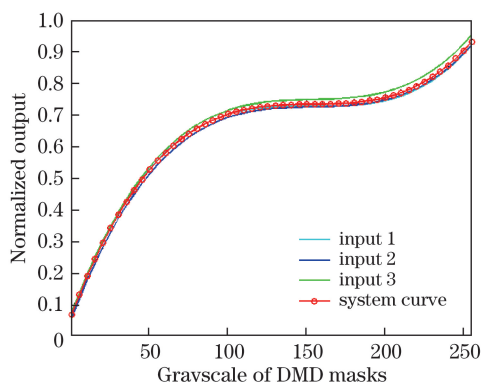


图 6 成像系统响应曲线的多项式拟合效果图

Fig. 6 Response curve of imaging system with polynomial fitting

由于成像系统的响应曲线均为非线性的连续函数,可采用多项式函数拟合出该响应曲线。实验中,依次利用 3~5 阶多项式进行曲线拟合,经比较后选用效果较佳的 3 次多项式拟合,其拟合结果如图 6 所示,用红色曲线表示。故可采用 3 次拟合的多项式方程表示系统的响应曲线:

$$D(x) = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}, \quad (17)$$

式中 \mathbf{X} 为 x 的多次阵列, $\mathbf{X} = [x^3, x^2, x, 1]^T$; \mathbf{R} 为

$$1 \times 4 \text{ 的系数方程 } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1.8268 \times 10^{-7} \\ -8.4058 \times 10^{-5} \\ 0.0130 \\ 0.0657 \end{bmatrix}^T.$$

因此,在同一外界环境下,对不同的被测物实现高动态范围成像,可利用(17)式的结果获得 DMD 掩模的灰度与采集图像亮度之间的函数关系,有利于 DMD 掩模精确地自适应调整。

5 结 论

为突破普通数字相机动态范围的限制,在不改变原图像探测器结构的情况下,设计了一套新型的 DMD 相机,动态范围可提高至 96 dB 以上。同时,结合该成像系统的结构及成像特征,引入加权函数并采用最小二乘法等数学分析方法先后完成了 DMD 的调光响应曲线以及 CMOS 图像探测器响应曲线的标定,并在此基础上完成了 DMD 相机的响应曲线的快速标定。最后,通过大量的实验证明了 DMD 作为空间光调制器具有良好的线性度,根据 CMOS 图像探测器的响应曲线函数可获得图像灰度与输入辐照度的定量关系,并解算出 DMD 掩模的灰度与采集图像亮度之间的函数关系,为实现 DMD 掩模的自适应调整提供了重要依据。此外,本文所提出的响应曲线标定方法将为其他基于空间光调制器的计算成像系统的响应曲线标定提供重要参考。

参 考 文 献

- [1] Quan W, Wang Y, Wang Y C, *et al.* Constructing panoramic high dynamic range image based on different amounts of exposures[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(10): 2531-2537, 2545.
权巍, 王颖, 王艳春, 等. 基于多曝光的高动态范围全景图像合成[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(10): 2531-2537, 2545.
- [2] Piao Y J, Xu W, Wang S J, *et al.* Fast multi-exposure image fusion for HDR video[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6): 1032-1041.
朴永杰, 徐伟, 王绍举, 等. 高动态范围视频的多曝光图像序列快速融合[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(6): 1032-1041.
- [3] Ward G J, Seetzen H, Heidrich W. Electronic camera having multiple sensors for capturing high dynamic range images and related methods: US8242426 [P]. 2012-08-14.
- [4] Ikebe M, Saito K. A wide-dynamic-range compression image sensor with negative-feedback resetting[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7(5): 897-904.
- [5] Sun H H, He S W, Wu P, *et al.* Design and imaging analysis of high dynamics scientific CMOS camera[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017,

- 32(3): 240-248.
- 孙宏海, 何舒文, 吴培, 等. 高动态科学级 CMOS 相机设计与成像分析[J]. 液晶与显示, 2017, 32(3): 240-248.
- [6] Lü T, Fu D H, Chen X Y, *et al.* High dynamic range imaging technology using DMD[J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 644-650.
- 吕涛, 付东辉, 陈小云, 等. 利用 DMD 获取高动态范围图像技术[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 644-650.
- [7] He S W, Wang Y J, Sun H H, *et al.* High dynamic range imaging based on DMD[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8): 0811001.
- 何舒文, 王延杰, 孙宏海, 等. 基于 DMD 的高动态范围场景成像技术[J]. 光子学报, 2015, 44(8): 0811001.
- [8] Dudley D, Duncan W, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[C]. MOEMS Display and Imaging Systems, International Society for Optics and Photonics, 2003, 4985: 14-26.
- [9] Feng W, Zhang F, Wang W, *et al.* Digital micromirror device camera with per-pixel coded exposure for high dynamic range imaging[J]. Applied Optics, 2017, 56(13): 3831-3840.
- [10] Wang W J, Zhang F M, Feng W, *et al.* Pixel-level mapping method based on digital micromirror imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 121101.
- 王惟婧, 张福民, 冯维, 等. 基于数字显微镜成像系统的像素级映射方法[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 121101.
- [11] Fang H M, Yi B S, Gan L C, *et al.* A fast calibration method of camera response function for high dynamic range image[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(6): 737-741.
- 方华猛, 易本顺, 甘良才, 等. 高动态范围图像合成中相机响应函数的快速标定[J]. 光子学报, 2013, 42(6): 737-741.
- [12] Du L, Sun H Y, Zhang T H, *et al.* High dynamic range image fusion based on camera response function[J]. Computer Engineering & Science, 2015, 37(7): 1331-1337.
- 都琳, 孙华燕, 张廷华, 等. 基于相机响应曲线的高动态范围图像融合[J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(7): 1331-1337.
- [13] Shu N, Chen X W. New method of recovering response curve in process of HDRI constructing[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(3): 1032-1036.
- 舒妮, 陈孝威. HDRI 合成中新的相机响应曲线算法[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(3): 1032-1036.
- [14] Nayar S K, Mitsunaga T. High dynamic range imaging: spatially varying pixel exposures[C]. Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000: 472-479.
- [15] Park W J, Ji S W, Kang S J, *et al.* Stereo vision-based high dynamic range imaging using differently-exposed image pair[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1473.
- [16] Li D, Cang J, Xia X X, *et al.* Investigation on back-modulation long distance three-dimensional imaging based on compressed sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111002.
- 李东, 仓吉, 夏新星, 等. 基于压缩感知的后调制远距离三维成像研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111002.
- [17] Ma J S, Cheng B C, Cao W B, *et al.* Holographic display system of digital micro-mirror devices based on LED light source[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0709001.
- 马建设, 程炳超, 曹文波, 等. 基于 LED 光源的数字显微镜器件全息显示系统[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0709001.
- [18] Han C, Wei S, Quan X L, *et al.* Holographic display of digital micromirror device[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 190-194.
- 韩超, 韦穗, 权希龙, 等. 数字显微镜器件的全息显示[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 190-194.
- [19] Feng W, Zhang F, Qu X, *et al.* Per-pixel coded exposure for high-speed and high-resolution imaging using a digital micromirror device camera[J]. Sensors, 2016, 16(3): 331.
- [20] Xu Q X, Hou W M, Sheng S J, *et al.* 3-dimensional profiler based on digital micromirror device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1138-1144.
- 许琦欣, 侯文玫, 盛世杰, 等. 基于数字显微镜器件的三维轮廓测量及其性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1138-1144.
- [21] Qi L N, Zhang B, Wang Z K. Application of the OTSU method in image processing[J]. Radio Engineering, 2006, 36(7): 25-26.
- 齐丽娜, 张博, 王战凯. 最大类间方差法在图像处理中的应用[J]. 无线电工程, 2006, 36(7): 25-26.